



**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA**  
**CENTRO DE ENERGIAS ALTERNATIVAS E RENOVÁVEIS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS**



**DANIELLE BANDEIRA DE MELLO DELGADO**

**OTIMIZAÇÃO ECONÔMICA E AMBIENTAL DE UM  
SISTEMA DE POLIGERAÇÃO INCLUINDO ENERGIA  
SOLAR FOTOVOLTAICA E BIOMASSA:  
Estudo de caso em um hospital paraibano**

JOÃO PESSOA – PB

2015

**PPGER / MESTRADO ACADÊMICO / N° 01**

**DANIELLE BANDEIRA DE MELLO DELGADO**

**OTIMIZAÇÃO ECONÔMICA E AMBIENTAL DE UM SISTEMA DE  
POLIGERAÇÃO INCLUINDO ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E  
BIOMASSA: Estudo de caso em um hospital paraibano**

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Paraíba, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, área de concentração em Energias Renováveis, para a obtenção do título de Mestre.

Orientadora  
Prof<sup>a</sup>. Monica Carvalho, Ph.D.

**JOÃO PESSOA - PB  
2015**

D352o Delgado, Danielle Bandeira de Mello.  
Otimização econômica e ambiental de um sistema de poligeração incluindo energia solar fotovoltaica e biomassa: estudo de caso em um hospital paraibano / Danielle Bandeira de Mello Delgado.- João Pessoa, 2015.  
177f.  
Orientadora: Monica Carvalho  
Dissertação (Mestrado) - UFPB/CEAR  
1. Energia - fontes alternativas. 2. Energia solar fotovoltaica. 3. Geração distribuída. 4. Otimização.  
5. Poligeração.

UFPB/BC

CDU: 620.9(043)

**DANIELLE BANDEIRA DE MELLO DELGADO**

**OTIMIZAÇÃO ECONÔMICA E AMBIENTAL DE UM SISTEMA DE  
POLIGERAÇÃO INCLUINDO ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA E  
BIOMASSA: Estudo de caso em um hospital paraibano**

Dissertação apresentada à Universidade Federal da Paraíba, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Energias Renováveis do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, área de concentração em Energias Renováveis, para a obtenção do título de Mestre.

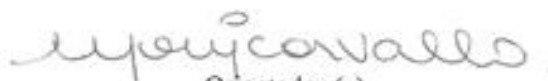
APROVADA em 04 de setembro de 2015.

Prof. Dr. Yuri Molina Rodriguez

UFPB

Prof. Dr. Helon David de Macedo

UFPB



Orientador (a)

Profª. Monica Carvalho, PhD

**JOÃO PESSOA - PB  
2015**

Esta dissertação trata-se de um compêndio de quatro artigos que apresentam os resultados obtidos em estudos sobre a otimização de um sistema de poligeração com inserção da energia solar fotovoltaica e biomassa para geração distribuída.

*Aos meus filhos, Filipe e Davi, que me fizeram descobrir que amor, compreensão e sorrisos realizam sonhos. DEDICO.*

# AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus acima de tudo por me direcionar e me abençoar em tudo que faço e por sempre colocar pessoas especiais na minha vida. Monica Carvalho é uma delas.

Ao meu amado esposo Kécio, amigo, companheiro fiel e auxiliador, que compreendeu a minha ausência e a supriu pacientemente no cuidado com os nossos filhos.

À minha melhor amiga, minha mãe, Aparecida, pelo acolhimento e pelas sábias palavras nos momentos mais turbulentos.

Ao meu pai, Raymilson, e aos meus irmãos, Netto, Júnior, Rodrigo e Rayanny pelas palavras de incentivo e pelo apoio emocional.

À minha orientadora, professora Monica Carvalho, que ultrapassou os limites do apoio acadêmico, demonstrando uma educação e sensibilidade sem tamanho. Você compreendeu minhas limitações, foi solidária nos momentos difíceis e vibrou comigo nos momentos de alegria. Não tenho dúvida de que o resgate dessa amizade foi a melhor parte desse trabalho. Deus permita que sigamos em frente com essa parceria.

Aos professores do PPGER, em especial, ao professor Luiz Moreira Coelho Junior, coordenador do programa, e ao vice-coordenador, Raphael Abrahão, pela dedicação e disponibilidade em colaborar com a realização desse trabalho.

Ao meu co-orientador Ricardo Chacartegui pelo apoio, mesmo estando distante.

À Cíntia Medeiros, uma amizade construída durante o curso que será para toda a vida.

À direção do IFBA, pela liberação para o curso e pela torcida por meu crescimento profissional.

À minha sogra, Paula, meu sogro, Neto, meu padrasto, João e minhas cunhadas: Janaina, Janailma, Priscila e Aninha que sempre torceram por mim e compreenderam meus momentos de ausência. Aos meus sobrinhos: Pedro, Daniel, João Pedro, Miguel, Ester, Yasmin e Amanda, que me proporcionaram momentos revigorantes e de imensa alegria.

Meus sinceros agradecimentos,



# Resumo

São apresentados nesta dissertação quatro artigos elaborados a partir dos resultados obtidos no estudo de caso realizado em um hospital público do estado da Paraíba, considerando aspectos econômicos, jurídicos e ambientais. Energia solar fotovoltaica e a biomassa foram incluídas na superestrutura de poligeração de uma unidade consumidora de grande porte, para a geração distribuída de energia. Um modelo de otimização baseado em Programação Linear Inteira Mista (PLIM) foi construído e resolvido para obtenção da solução ótima (configuração e operação otimizadas), desde objetivos econômico e ambiental. Informação ambiental foi gerada pela aplicação da metodologia da Análise de Ciclo de Vida (ACV) para os equipamentos e recursos energéticos da superestrutura. Também se apresenta um estudo, com base no direito comparado, da norma que regula a geração distribuída no Brasil. Verificou-se, de forma geral, que, apesar do Brasil possuir uma legislação bastante avançada e consolidada, ainda se carece de incentivos fiscais e econômicos para tornar a geração distribuída viável. A otimização econômica sugeriu a utilização da biomassa como recurso nas caldeiras para produção de água quente e vapor, e quando comparado a um sistema convencional, apresentou custo anual 10,99% inferior. A solução ambiental otimizada indicou a trigeração para minimizar os impactos ambientais produzidos pelo sistema de abastecimento e conversão de energia.

**Palavras-chave: Geração Distribuída, Otimização, Poligeração, Hospital.**

# Abstract

This M.Sc. dissertation includes four manuscripts, elaborated from the results obtained in a study case carried out at a public hospital in the Paraíba state (northeast Brazil), considering economic, legal and environmental aspects. Photovoltaic solar energy and biomass were included in the polygeneration superstructure for a large-sized consumer center, for distributed energy generation. An optimization model, based on Mixed Linear Integer Programming (MILP), was built and solved for the obtainment of optimal configuration and operation of the energy supply system under economic and environmental viewpoints. Environmental information was generated by the application of the Life Cycle Assessment methodology to the equipment of the superstructure as well as energy resources available. The regulation that encompasses distributed generation in Brazil is studied, in detail, on the basis of comparative law. It was verified, generally, that despite a rather advanced and consolidated regulation is in force, there is still a lack of fiscal and economic incentives to make distributed generation viable in Brazil. The economic optimization suggested the utilization of biomass in boilers for the production of hot water, and when compared to a conventional system, presented an annual cost 10.99% lower. The environmental optimal solution indicated trigeneration to minimize the environmental impacts produced by the supply and conversion energy system.

**Keywords: Distributed Generation, Optimization, Polygeneration, Hospital.**

# SUMÁRIO

Resumo.....	ix
Abstract .....	x
Lista de Figuras .....	xiv
Lista de Tabelas.....	xvi
Capítulo 1 Introdução.....	12
1.1 Motivação .....	12
1.2 Objetivos.....	13
1.2.1 Objetivo Geral .....	13
1.2.2 Objetivos específicos.....	13
1.3 Metodologia Adotada.....	14
1.4 Organização da Dissertação .....	15
Capítulo 2 Fundamentação Teórica e Revisão Bibliográfica .....	18
2.1 Geração Distribuída .....	18
2.2 Resolução Normativa nº 482/2012 da ANEEL.....	20
2.3 Energia Solar Fotovoltaica.....	22
2.3.1 Método da insolação.....	22
2.3.2 Atendimento com implantação de sistema de geração Fotovoltaica em paralelo com o sistema interligado da concessionária de energia .....	24
2.4 Otimização de Sistemas de Poligeração.....	24
2.5 Biomassa.....	26
2.6 Análise de Ciclo de Vida .....	28
Capítulo 3 Artigo 1 - Optimization of Energy Supply and Conversion in a Northeast Brazil Hospital: Use of Photovoltaic Panels .....	31
3.1 Introduction.....	32
3.2 Material and Methods .....	34
3.2.1 Energy Supply and Conversion System.....	34
3.2.2 Consumer Center and Considerations on the Study Case .....	35
3.2.3 Photovoltaic Solar Energy .....	40
3.2.4 Economic Considerations .....	41
3.2.5 Optimization Model.....	43
3.3 Results.....	46
3.3.1 Others Results.....	48

3.4	Conclusions.....	51
3.5	References.....	52
Capítulo 4 Artigo 2 - Custo Médio de produção e Modelo de Negócio para utilização de Biomassa em Caldeiras de um sistema de poligeração de um hospital do Nordeste Brasileiro.....		
4.1	Introdução .....	57
4.1.1	Caracterização do Hospital – Superestrutura .....	58
4.2	Materiais e Métodos.....	60
4.2.1	Descrição da Superestrutura e dos equipamentos que utilizam biomassa .....	60
4.2.2	Caracterização dos Combustíveis da Caldeira .....	61
4.2.3	Custo Médio de Produção.....	62
4.2.4	Plano de Negócio - <i>The Business Model Canvas</i> .....	64
4.2.5	Modelo de negócio para os tipos de biomassa disponíveis para o hospital .....	66
4.3	Resultados .....	68
4.4	Conclusões .....	70
4.5	Referências Bibliográficas .....	70
CAPÍTULO 5 Artigo 3 – Environmental Loads Associated with a Polygeneration Superstructure for a Tertiary Sector Building .....		
5.1	Introduction.....	74
5.2	Materials and Methods.....	76
5.2.1	Scope of Analysis .....	79
5.3	Analysis of Environmental Impact.....	84
5.4	Conclusions.....	88
5.5	References.....	89
Capítulo 6 Artigo 4 – Life Cycle Analysis as a Decision Criterion for the Implementation of Solar Photovoltaic Panels in a Northeast Brazil Hospital .....		
6.1	Introduction.....	93
6.2	Polygeneration System.....	94
6.3	Life Cycle Analysis.....	98
6.3.1	Equipment.....	99
6.3.2	Energy utilities.....	100
6.3.3	Optimization Model.....	101
6.4	Results and Discussion .....	103
6.5	References.....	107
Capítulo 7 Conclusões.....		
Referências Bibliográficas.....		
Apêndice I Artigo 5 - Modelo Regulatório da Microgeração e Minigeração Distribuída no Brasil: Uma Análise com Base no Direito Comparado .....		
I.1	Introdução .....	117
I.2	Metodologia Comparativa.....	119
I.3	Análise Comparativa.....	121
I.3.1	Objeto .....	121
I.3.2	Conceitos .....	123
I.3.3	Conexão ao Sistema Elétrico .....	126

I.3.4	Sistema de Vendas ou Compensação de Excedentes.....	129
I.3.5	Aspectos Contratuais .....	132
I.4	Considerações Finais .....	136
I.5	Referências Bibliográficas .....	137
Apêndice II	Otimização .....	140
Apêndice III	Dados .....	158

# Lista de Figuras

Figura 1.1: Metodologia adotada no trabalho.....	14
Figura 2.1: Distribuição da Microgeração e Minigeração por classe de consumo (BRASIL, 2015). .....	19
Figura 2.2: Número de Conexões por fonte (BRASIL,2015).....	20
Figura 2.3: Participação de Fontes Renováveis na Matriz Energética Mundial (BEN,2015).....	27
Figure3.1(a – h): energy demands for weekdays (left) and weekends/holidays (right), for January (a, b) April (c, d), July (e, f) and October (g, h).....	39
Figure 3.2: Polygeneration superstructure for the hospital.....	42
Figura 4.1: Superestrutura de poligeração. ....	60
Figura 4.2: Gráfico comparativo do valor do MWh para os tipos de biomassa .....	62
Figura 4.3: Tríade para o empreendimento. ....	65
Figura 4.4: Custo Anual Total.....	69
Figure 5.1: Polygeneration superstructure for the hospital.....	77
Figure 5.2: Environmental Load Network of Diesel Generator .....	86
Figure 5.3: Environmental Load Network of Photovoltaic System .....	86
Figure 5.4: Environmental Load Network of Gas Engine.....	87
Figure 6.1: Superstructure illustrating all potential conversion pathways considered. ..	96
Figure 6.2: Boundaries of the polygeneration system. ....	101
Figure 6.3: Optimal environmental system annual flows (MWh/year).....	106
Figura I.1: Evolução da Microgeração e Minigeração Distribuída no Brasil (BRASIL, 2015).....	119
Figura I.2: Metodologia comparativa entre os dispositivos legais .....	121
Figura I.3. Número de Conexões por distribuidora de Energia (ANEEL, 2015). .....	127
Figura I.4: Procedimento para solicitação de acesso à rede de distribuição da empresa distribuidora. ....	128

Figura I.5: Sistema de compensação de energia produzida excedente na regulamentação brasileira. .... 131

# Lista de Tabelas

Table 3.1: Matrix of technical production coefficients and technology data (Romero, Carvalho & Millar, 2014b). .....	42
Table 3.2: Minimum annual cost for the polygeneration system with 200 PV panels installed.....	47
Table 3.3: Cost for the panels and economic minimum.....	48
Table 3.4: Matrix of technical production coefficients and technology data Rótulo11 with biomass engine.....	50
Table 3.5: Minimum annual cost for the polygeneration system with biomass engine.	50
Tabela 4.1: Combustíveis utilizados na Caldeira .....	61
Tabela 4.2: Custo Total Anual por tipo de Biomassa.....	64
Tabela 4.3: <i>Business Model Canvas</i> - LENHA. ....	67
Tabela 4.4: <i>Business Model Canvas</i> – BAGAÇO DE CANA DE ACÚCAR. ....	67
Tabela 4.5: <i>Business Model Canvas</i> – PELLETS. ....	68
Tabela 4.6: Comparação entre o custo do MWh das Biomassas e do MWh da Energia Elétrica.....	69
Table 5.1: Main components of the superstructure equipment .....	81
Table 5.2: Energy Resources considered in the superstructure .....	82
Table 5.3: CO <sub>2</sub> emissions for the superstructure equipment .....	85
Table 5.4: CO <sub>2</sub> emissions for 1 kWh of energy resource consumption. ....	85
Table 6.1: Energy demands of the hospital. ....	95
Table 6.2: Matrix of technical production coefficients and technology data (Carvalho, Romero & Millar, 2014). .....	97
Table 6.3: Main material composition of technologies and corresponding environmental emissions. ....	99
Table 6.4: Minimum annual cost for the polygeneration system with 200 PV panels installed.....	104
Tabela 7.1: Resultados das otimizações econômica e ambiental .....	112
Tabela I.1: Análise Comparativa do Objeto das Normas Jurídicas.....	122
Tabela I.2: Análise Comparativa dos Conceitos apresentados nas Normas Jurídicas..	124



Tabela I.3: Análise Comparativa da Conexão ao Sistema Elétrico das Normas Jurídicas .....	126
Tabela I.4: Análise Comparativa do Sistema de venda ou compensação de excedentes das Normas Jurídicas. ....	130
Tabela I.5: Análise Comparativa dos Aspectos Contratuais das Normas Jurídicas. ....	132

## Introdução

### 1.1 Motivação

No cenário mundial, apesar de o Brasil apresentar um grande potencial energético e ter avançado significativamente nos últimos anos no incentivo a utilização das fontes renováveis não convencionais de energia, o uso destas, se comparadas ao de outros países, ainda é incipiente. A irradiação solar diária média anual do Brasil é de 1.500 a 2.400 kWh/m<sup>2</sup>/ano enquanto que a da Alemanha, país que é líder na produção de energia solar mundial, é de 900 a 1250 kWh/m<sup>2</sup>/ano (PEREIRA *et al.*, 2006).

A Resolução Normativa N° 482/2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) foi aprovada para incentivar os pequenos produtores de energia renovável (seja de fonte hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada) para que possam fornecer excedente à rede pública, obtendo assim, uma redução no valor a ser pago na conta de energia. No entanto, observa-se que o alto custo de instalação, a regulamentação obscura e a tributação aplicada afastam potenciais consumidores interessados.

No Estado da Paraíba, um dos lugares do Brasil com maior incidência de raios solares (BRASIL, 2008; TIBA *et al.*, 2000), até a presente data, apenas treze unidades consumidoras estão gerando energia sob a égide da Resolução Normativa N° 482/2012, sendo sete delas no município de João Pessoa (ANEEL, 2015).

Este projeto apresenta, por meio de um estudo de caso em um hospital público paraibano, algumas considerações econômicas e ambientais sobre a otimização de sistemas de poligeração em unidades consumidoras que utilizem geração distribuída. Adicionalmente, realizou-se uma análise, com base no direito comparado, do instrumento legal que a regula.

Apesar da ferramenta aqui proposta ter sido utilizada para um estudo específico, com foco na Paraíba, o trabalho tem uma aplicação científica global, mais ampla. A

abordagem na dimensão local, e até mesmo o foco específico no setor de edifícios terciários, hospitalar, foi somente uma maneira de demonstrar a relevância da ciência.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivos gerais:

- a) A Análise jurídico-econômica e ambiental da utilização da geração distribuída no Brasil com base na Resolução Normativa N° 482/2012 da ANEEL (2012).
- b) A Viabilidade da utilização da energia solar fotovoltaica e da biomassa em um sistema de poligeração instalado em um hospital paraibano.
- c) A Análise sob perspectivas econômica e ambiental, incluindo principais vantagens e desvantagens.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do presente trabalho são:

- a) Apresentar a Resolução Normativa N° 482/2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica;
- b) Realizar, com base no Direito Comparado, uma análise do modelo regulatório adotado no Brasil;
- c) Simular, através de dados contratuais reais e de demanda de energia de um hospital paraibano, a utilização da minigeração distribuída, tendo como uma das fontes a energia solar fotovoltaica;
- d) Analisar os custos e elaborar um plano de negócio para utilização da biomassa em caldeiras para produção de água quente e vapor de um sistema de poligeração previsto para o hospital;
- e) Quantificar as cargas ambientais dos equipamentos e recursos energéticos previstos na superestrutura do hospital para subsidiar o modelo de otimização ambiental;

- f) Otimizar a configuração e a operação do sistema de poligeração do hospital, objetivando a redução dos custos anuais e dos impactos ambientais, realizando ainda análises de sensibilidade para verificar a resiliência das soluções encontradas;

### 1.3 Metodologia Adotada

A Figura 1.1 apresenta a metodologia adotada neste trabalho e consiste basicamente em duas etapas: i) pesquisa bibliográfica, tendo como alicerce teórico a Resolução Normativa N° 482/2012 da ANEEL e ii) estudo de caso, com a simulação do uso da energia solar fotovoltaica e biomassa como recursos disponíveis para instalação em um sistema de fornecimento energético para um hospital.

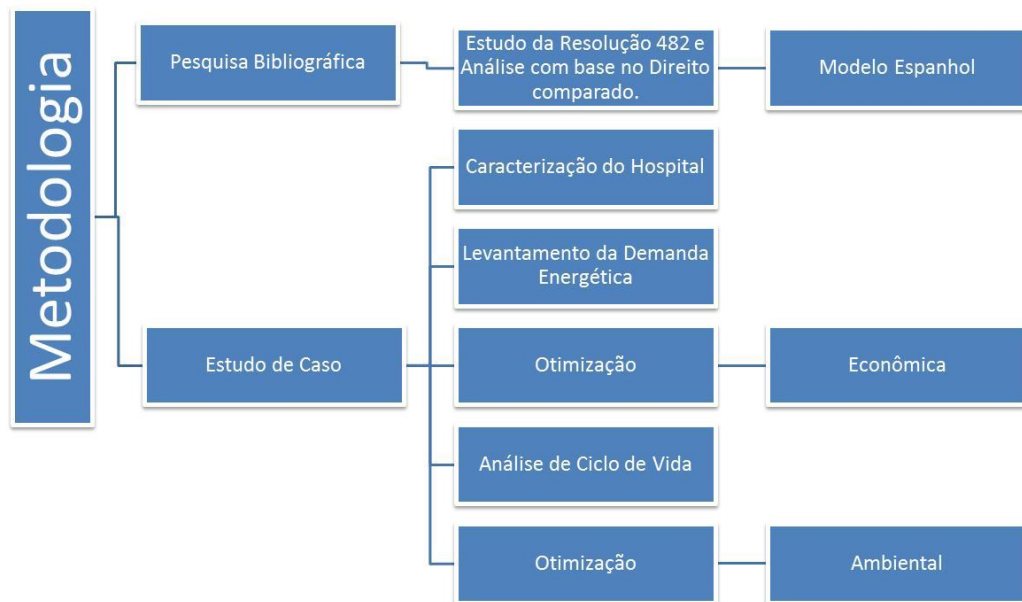


Figura 1.1: Metodologia adotada no trabalho

A fonte principal da pesquisa bibliográfica será a Resolução Normativa N° 482/2012 da ANEEL (ANEEL, 2012), cujo teor será analisado, criticado e aplicado ao estudo de caso para verificação de sua eficácia, vantagens e desvantagens. Adicionalmente será realizada uma pesquisa, com base no Direito Comparado, do modelo regulatório da geração distribuída adotado na Espanha, para fundamentar a realização de um estudo comparativo ao modelo adotado no nosso país.

Para o estudo de caso, a pesquisa bibliográfica será alicerçada principalmente nos fundamentos do uso da Energia Solar Fotovoltaica para geração distribuída, e Biomassa para utilização em caldeiras. Para subsidiar a simulação desse sistema em um hospital, um modelo de otimização baseado em Programação Linear Inteira Mista (PLIM) será utilizado. A solução deste modelo permitirá conhecer o valor de todos os fluxos energéticos e o resultado de uma avaliação econômica, selecionando a melhor configuração do sistema (tipo e número de equipamentos) e a maneira mais conveniente de operá-lo de modo a obter o mínimo custo. Também se realizará a otimização com critérios ambientais, por meio da metodologia da Análise de Ciclo de vida, de modo a se obter uma solução ótima com mínimo impacto ambiental. Os resultados de ambas as otimizações serão comparados e interpretados.

Para os estudos econômicos de análise de viabilidade, custos de implantação e análise de sensibilidade, será necessário abordar alguns conceitos da Economia e da Administração, tais como Custo Médio de Produção, Análise de Projetos e Modelos de Negócio. Também se prevê a realização de análises de sensibilidade para a otimização ambiental, nas quais variar-se-ão os impactos ambientais associados aos diversos recursos energéticos disponíveis.

#### 1.4 Organização da Dissertação

O modelo de dissertação apresentado é o de um compêndio de artigos e foi organizado de acordo com a seguinte estrutura:

No capítulo 2 será apresentada a fundamentação teórica e a revisão bibliográfica necessária para o alicerce doutrinário dos conteúdos gerais apresentados neste trabalho. Serão apresentadas noções gerais sobre Geração Distribuída, Resolução Normativa nº482/2012, Energia Solar Fotovoltaica, Otimização de Sistemas de Poligeração, Biomassa para uso em Caldeiras e Análise de Ciclo de Vida. Nos capítulos seguintes, na introdução de cada artigo é apresentada uma fundamentação teórica mais específica para o assunto abordado.

No capítulo 3 o artigo “*Optimization of Energy Supply and Conversion in a Northeast Brazil Hospital: Use of Photovoltaic Panels*”, aborda o estudo de caso realizado com base nas informações de demandas energéticas do hospital caracterizado, com a inserção da energia solar fotovoltaica para geração distribuída em um sistema de

poligeração previsto para atendimento a essas demandas. O objetivo do artigo é a otimização econômica desse sistema com a apresentação de análise de sensibilidade e resiliência dos resultados obtidos. Este artigo foi aceito para apresentação no “23<sup>rd</sup> *International Congress of Mechanical Engineering*” (COBEM), que acontecerá no período de 06 a 11 de dezembro de 2015 no Rio de Janeiro.

O artigo “Custo Médio de produção e Modelo de Negócio para utilização de Biomassa em Caldeiras de um sistema de poligeração de um hospital do Nordeste Brasileiro” é apresentado no capítulo 4 e teve como objetivo a análise econômica de três tipos de biomassa, como critério de escolha para utilização em caldeiras para produção de água quente e vapor do hospital. São apresentados modelos de negócio para o fornecimento de cada tipo de biomassa analisada, a saber: lenha, bagaço de cana de açúcar e pellets de madeira. Este artigo foi submetido ao IV Simpósio Internacional de Gestão de Projetos, Inovação e Sustentabilidade (IV SINGEP), que ocorrerá no período de 08 a 10 de novembro de 2015.

O capítulo 5 é destinado a apresentação do artigo “*Environmental Loads Associated with a Polygeneration Superstructure for a Tertiary Sector Building*”, cujo objetivo foi a realização da Análise do Ciclo de Vida (ACV) dos equipamentos e recursos energéticos disponíveis para o sistema de poligeração do hospital caracterizado no estudo de caso. Este artigo foi aceito para apresentação no “23<sup>rd</sup> *International Congress of Mechanical Engineering*” (COBEM), que acontecerá no período de 06 a 11 de dezembro de 2015 no Rio de Janeiro.

No capítulo 6 foi apresentado o artigo “*Life Cycle Analysis as a decision criterion for the implementation of Solar Photovoltaic Panels in a Northeast Brazil Hospital*” cujo objetivo foi a otimização, com base nos resultados obtidos no artigo do capítulo anterior, em busca da configuração ambiental ótima, a ser utilizada como critério de decisão para aquisição dos equipamentos. Este artigo foi apresentado na “*Global Conference on Global Warming*” no período de 24 a 27 de maio de 2015, em Atenas, na Grécia, obtendo, inclusive, indicação para publicação na revista *International Journal of Global Warming, IJGW*.

A conclusão é apresentada no capítulo 7, e em seguida, são relacionadas as referências bibliográficas que fundamentaram a introdução e o capítulo 2 deste trabalho.

As referências adotadas na construção dos artigos científicos são apresentadas nos respectivos capítulos.

No apêndice I será apresentado o artigo desenvolvido sobre o tema, intitulado: “Modelo Regulatório da Microgeração e Minigeração Distribuída no Brasil: Uma Análise com base no Direito Comparado”, cujo objetivo foi a realização de um estudo de direito comparado da legislação que regula a microgeração e minigeração distribuída no Brasil com a legislação que regula a geração de energia para o autoconsumo na Espanha. Este artigo foi submetido ao IV Simpósio Internacional de Gestão de Projetos, Inovação e Sustentabilidade (IV SINGEP), que ocorrerá no período de 08 a 10 de novembro de 2015.

Nos apêndices II e III são apresentadas as linhas do programa de otimização e os dados de entrada.

As versões dos artigos aqui publicadas incluem os comentários, sugestões e correções da banca examinadora.

## Capítulo 2

# Fundamentação Teórica e Revisão Bibliográfica

### 2.1 Geração Distribuída

Diferente da geração convencional, onde a produção de energia é feita por grandes usinas, de forma centralizada, pode-se dizer que a Geração Distribuída (GD) é a unidade de produção de energia elétrica realizada junto ou próxima do centro de consumo final, cujas principais vantagens são a redução nos investimentos de transmissão e das perdas na distribuição.

Considera-se GD aquela que: (a) está conectada à rede de distribuição; (b) está conectada ao lado de um consumidor conectado a algum ponto do sistema elétrico; (c) supre cargas elétricas de uma instalação eletricamente isolada; ou (d) está conectada diretamente à rede de transmissão, desde que, neste caso, ela não possa ser considerada pertencente à geração centralizada (SEVERINO *et al*, 2008). São exemplos de geração distribuídas as PCH's – Pequenas Centrais Hidrelétricas, a cogeração, os geradores de emergência e a utilização de sistemas de painéis solares fotovoltaicos para geração de energia.

No Brasil, o primeiro conceito de Geração Distribuída (GD) foi abordado no artigo 14 do decreto nº 5163/2004 (BRASIL, 2004), que regulamenta a comercialização de energia elétrica, o processo de outorga de concessões e de autorizações de geração de energia elétrica, e dá outras providências:

Art. 14. Para os fins deste Decreto, considera-se geração distribuída a produção de energia elétrica proveniente de empreendimentos de agentes concessionários, permissionários ou autorizados, incluindo aqueles tratados pelo art. 8º da Lei no 9.074, de 1995, conectados diretamente no sistema elétrico de distribuição do comprador, exceto aquela proveniente de empreendimento:

I - hidrelétrico com capacidade instalada superior a 30 MW; e

II - termelétrico, inclusive de cogeração, com eficiência energética inferior a setenta e cinco por cento, conforme regulação da ANEEL, a ser estabelecida até dezembro de 2004.



Parágrafo único. Os empreendimentos termelétricos que utilizem biomassa ou resíduos de processo como combustível não estarão limitados ao percentual de eficiência energética prevista no inciso II do caput (BRASIL, 2004).

Esse foi um contexto onde a geração distribuída era tipificada apenas para as pequenas centrais hidrelétricas (PCH's) cuja potência instalada fosse superior a 30 MW, as termelétricas e a cogeração qualificada, no limite de eficiência inferior a 75% (setenta e cinco por cento). A regulamentação do uso dos recursos renováveis para geração apareceu, nesse primeiro momento, apenas com a referência à biomassa e resíduos de processo. Também não se abordava a questão da produção de energia para o autoconsumo.

A GD tem, no Sistema Elétrico de Potência, inúmeras vantagens técnicas e ambientais, tanto para o consumidor final quanto para a empresa distribuidora de energia, repercutindo inclusive, na sociedade como um todo. Essas vantagens foram sendo percebidas, mesmo que timidamente, e a GD começou a ser utilizada pelas empresas distribuidoras de energia elétrica no suprimento de energia de áreas mais isoladas, em sistemas remotos.

Hoje, no que se refere ao autoconsumo, pode-se dizer que é o atendimento prioritário da GD. Após a regulamentação da microgeração e minigeração distribuída pelo governo, o número de instalações vem crescendo gradativamente, principalmente na classe residencial (Figura 2.1).

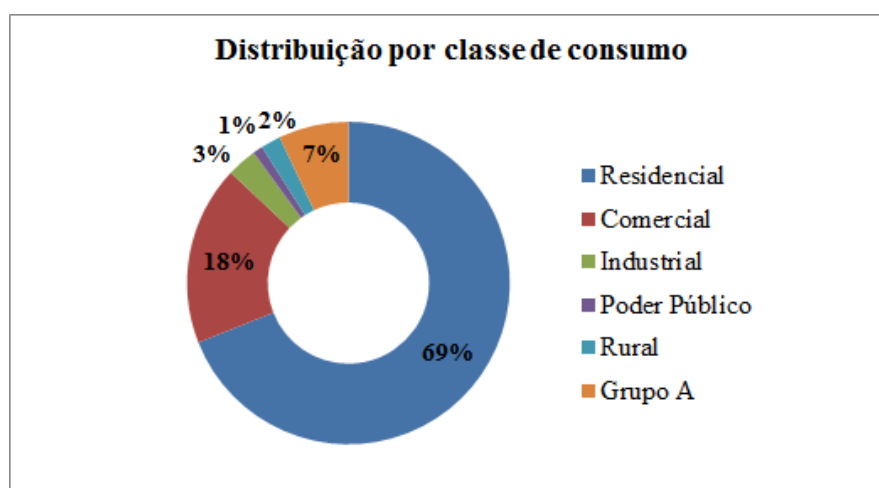


Figura 2.1: Distribuição da Microgeração e Minigeração por classe de consumo (BRASIL, 2015).

O Brasil possui 3351 agentes investindo no mercado de geração de energia elétrica, dentre os quais, 533 são registrados como micro ou minigeradores, conforme os requisitos estabelecidos pela Resolução nº482/2012 (BRASIL, 2015). Dentre as fontes mais

utilizadas, a Energia Solar Fotovoltaica é a que mais se destaca, principalmente pela abundância do recurso energético no país, além da facilidade de instalação, manutenção e operação dos equipamentos necessários para a sua utilização. Na Figura 2.2 apresenta-se a expressiva utilização da energia solar fotovoltaica como fonte para microgeração e minigeração distribuída no Brasil.

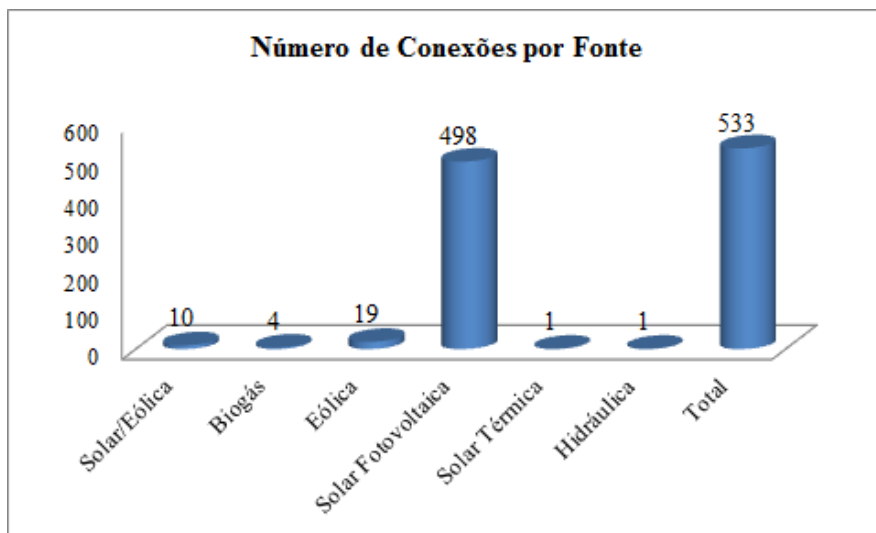


Figura 2.2: Número de Conexões por fonte (BRASIL,2015).

## 2.2 Resolução Normativa nº 482/2012 da ANEEL

Diante da necessidade iminente de se incluir a geração distribuída na matriz energética brasileira e, sob a perspectiva de que tal inclusão exige uma considerável complexidade técnica de operação, onde o relacionamento entre a empresa distribuidora e a unidade geradora/consumidora deve ser regulado, é que surge a Resolução Normativa nº482/2012 (BRASIL, 2012).

Publicada pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), em 17 de abril de 2012, a Resolução Normativa nº482/2012 estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica e define o sistema de compensação de energia elétrica (BRASIL, 2012).

Os conceitos de microgeração e minigeração distribuída são apresentados no art.2º, I e II do referido instrumento normativo (BRASIL, 2012), sendo o primeiro, definido como a central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 100 kW e que utilize fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, conectada na rede de distribuição por

meio de instalações de unidades consumidoras; e o segundo, definido como a central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 100 kW e menor ou igual a 1 MW, que utilizem as mesmas fontes indicadas na definição da microgeração.

Com o objetivo de estimular a utilização de fontes renováveis de energia e a adesão de unidades micro ou minigeradoras, a Resolução Normativa nº482/2012 regulamentou a implantação do sistema de compensação de energia elétrica, onde o montante de energia gerado pela unidade pode ser injetado na rede de fornecimento convencional, cuja responsabilidade é da empresa distribuidora de energia, permitindo, no prazo de até 36 meses, uma compensação do que foi gerado pelo que foi consumido por esta unidade, ou outra, desde que seja de mesma titularidade.

A norma estabeleceu ainda, o prazo de 240 dias, a contar da data da sua publicação, para que as empresas distribuidoras de energia elaborassem e publicassem, de acordo com o módulo 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST (BRASIL,2015), suas normas e padrões técnicos de conexão da unidade geradora à rede convencional, sendo a responsabilidade pelos custos da implantação do sistema do gerador/consumidor interessado.

A forma estipulada para compensação de energia fixa a cobrança mínima do custo de disponibilidade, estabelecendo as regras do faturamento de acordo com o posto horário, nos caso em que se aplica, determinando a compensação da energia injetada com a energia consumida dentro do ciclo de faturamento. Os créditos têm, no máximo, 36 meses para serem compensados, após esse prazo, a unidade geradora/consumidora perde os direitos de compensação.

Merecem destaque ainda, no texto normativo em estudo, os assuntos referentes às responsabilidades das partes que pactuam na relação distribuidora e geradora/consumidora. Pelos danos causados ao sistema elétrico, a Resolução Normativa nº482/2012, remetendo aos arts. 164 e 170 da Resolução Normativa nº 414/2010, estabelece que a responsabilidade pela instalação de equipamentos corretivos, que promovam o ressarcimento dos danos causados pelos distúrbios ou danos causados ao sistema elétrico de distribuição pelo consumidor/gerador, é deste. Adicionalmente, o fornecimento de energia poderá ser suspenso por deficiência técnica ou de segurança na unidade geradora/consumidora (BRASIL, 2010). No caso de divulgação e coleta das informações referentes às unidades geradoras, a responsabilidade é da empresa distribuidora de energia.

## 2.3 Energia Solar Fotovoltaica

A energia solar fotovoltaica é caracterizada pela produção de corrente elétrica através da captação direta da luz solar. Essa corrente é coletada e processada por dispositivos controladores e conversores, podendo ser armazenada por baterias ou utilizada diretamente em sistemas conectados à rede elétrica (VILLALVA & GAZOLI, 2013).

Os sistemas fotovoltaicos autônomos são aqueles utilizados principalmente em locais onde não existe o atendimento por rede elétrica. Também são chamados de sistemas isolados e podem ser empregados em áreas rurais substituindo os geradores movidos a diesel, diminuindo assim a poluição e o ruído.

Basicamente, os equipamentos que compõem um sistema fotovoltaico autônomo são: Módulo ou painel solar e o inversor de tensão. Em algumas aplicações exigem-se baterias e o controlador de carga, cuja função principal é prolongar a vida útil da bateria, protegendo-a contra sobrecarga ou descargas excessivas. O dimensionamento de um sistema de geração solar fotovoltaico é explicado nos tópicos a seguir.

### 2.3.1 Método da insolação

É o método utilizado quando se tem a informação sobre a energia do sol disponível diariamente no local da instalação, que podem ser encontradas em mapas solarimétricos ou através de alguma ferramenta computacional.

$$E_p = E_s \times AM \times \eta_M. \quad (2.1)$$

Em que:

$E_p$  = Energia produzida pelo módulo diariamente [Wh]

$E_s$  = Insolação Diária [Wh/m<sup>2</sup>/dia]

$AM$  = Área da superfície do módulo [m<sup>2</sup>]

$\eta_M$  = Eficiência do módulo

O dimensionamento das baterias consiste em determinar os tipos, a quantidade e a forma de disposição das baterias que serão utilizadas no sistema (Equações 2.2- 2.5).

$$NBS = \frac{V_{banc}}{V_{bat}}. \quad (2.2)$$

Em que:

$NBS$  = Número de baterias ligadas em série

$V_{banc}$  = Tensão do banco de baterias [V]

$V_{bat}$  = Tensão da bateria utilizada [V]

$$C_{banc} = \frac{EA}{V_{banc}}. \quad (2.3)$$

Em que:

$C_{banc}$  = Capacidade do banco de baterias em ampére-hora [Ah]

$EA$  = Energia armazenada no banco de baterias [Wh]

$V_{banc}$  = Tensão do banco de baterias [V]

$$EA = \frac{EC}{PD}. \quad (2.4)$$

Em que:

$EA$  = Energia armazenada no banco de baterias [Wh]

$EC$  = Energia consumida [Wh]

$PD$  = Profundidade de descarga permitida

O levantamento da Energia Consumida ( $EC$ ) é feito multiplicando-se a potência em Watts de cada equipamento pelo tempo em horas em que o mesmo fica em uso.

$$NPB = \frac{C_{banc}}{C_{bat}}. \quad (2.5)$$

Em que:

$NPB$  = Número de conjuntos de baterias ligados em paralelo

$C_{banc}$  = Capacidade do banco de baterias em ampére-hora [Ah]

$C_{bat}$  = Capacidade de carga de cada bateria em ampére-hora [Ah]

### 2.3.2 Atendimento com implantação de sistema de geração Fotovoltaica em paralelo com o sistema interligado da concessionária de energia

Atualmente em grande expansão, o uso da energia solar fotovoltaica é o que mais cresce em todo o mundo, principalmente no que se refere à produção para o autoconsumo. No Brasil, com a publicação da Resolução Normativa nº482/2012 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2012), que estabelece as condições gerais para o acesso a microgeração e minigeração distribuída, aos sistemas de distribuição de energia elétrica, a utilização dessa fonte de energia também vem crescendo. A possibilidade de compensação da energia consumida pela gerada, aliada à praticidade de instalação e manutenção do sistema, o torna bastante atrativo.

O sistema fotovoltaico híbrido opera em paralelo ao sistema convencional de fornecimento (rede elétrica) e é empregado em locais que já dispõem do atendimento. Seu principal objetivo é gerar a eletricidade para reduzir, ou até eliminar o consumo, e ainda, ter a possibilidade de gerar excedentes de energia.

O dimensionamento do sistema fotovoltaico híbrido é realizado da mesma maneira que a do sistema autônomo. A grande diferença entre os dois está na filosofia do inversor que é utilizado. Nos sistemas conectados a rede os inversores só funcionam quando conectados.

## 2.4 Otimização de Sistemas de Poligeração

Dentre as várias possibilidades existentes para configurar um sistema energético, pode-se citar principalmente a maneira tradicional (equipamentos convencionais, cujas conversões individuais de energia atendem às demandas energéticas do centro consumidor) e a utilização princípios de integração energética (mais elaborada, que aproveita ao máximo os fluxos de energia). Define-se poligeração como sendo a produção combinada de dois ou mais serviços energéticos, cujo objetivo é atingir o máximo aproveitamento das diversas fontes de energia utilizadas. Apresenta como principal vantagem o uso eficiente dessas fontes, já que nos sistemas de poligeração, exige-se um estudo mais detalhado da relação geração-consumo. Destacam-se ainda como vantagens, a confiabilidade e a

continuidade no fornecimento de energia, além de um melhor aproveitamento, se comparados a sistemas autônomos. Tanto a poligeração quanto a integração energética são ferramentas promissoras para alcançar uma melhor eficiência no uso dos recursos naturais, e na maioria dos casos, também uma redução nos impactos ambientais gerados (SERRA *et al.*, 2009).

Como já visto, a poligeração tem como principal objetivo a diversificação das fontes energéticas, caracterizada pela produção combinada de energia elétrica e térmica, e pode até incluir a dessalinização de água (RUBIO-MAYA, UCHE, MARTINEZ, 2011) e produção de syngas e syndiesel (YANG, 2013; ROMERO, CARVALHO, MILLAR, 2014a).

A otimização de sistemas de poligeração para fornecimento de energia ainda é um problema complexo, devido à grande variedade de opções tecnológicas para o fornecimento e conversão de energia, grandes variações diárias e anuais nas demandas energéticas, e ainda variações dos preços e tarifas de energia. Segundo Shang e Kokossis (2005), esta variabilidade presente nas demandas energéticas requer uma metodologia de projeto que resulte em sistemas que produzam eficientemente (objetivo termodinâmico), sejam capazes de se adaptar a diferentes condições de demanda e mercado (flexibilidade operacional), além de operar com custo econômico mínimo.

Segundo Serra *et al.* (2009), aparte dos métodos heurísticos, existem duas formas de se abordar a síntese de um sistema de fornecimento de energia: análise termodinâmica e otimização.

A análise termodinâmica possui o objetivo de minimizar as perdas de energia e tem a vantagem de proporcionar informações sobre o sistema, além de ser mais simples do ponto de vista computacional. Algumas metodologias comumente aplicadas à análise de sistemas de energia são a análise termoeconômica e o método *pinch*. Porém, a análise termodinâmica não oferece condições para resolver diferentes tipos de problemas de maneira sistemática nem simultânea (CARVALHO, 2011).

A programação matemática é um exemplo de forma de otimização, amplamente aplicada ao projeto e engenharia de processos (BIEGLER, GROSSMAN, 2004; FRANGOPOULOS, 2009). Mais especificamente, a programação linear inteira (PLI) lida com variáveis binárias ou inteiras para expressar quantidade, decisão, e relações lógicas. PLI consegue lidar com a complexidade inerente a otimização de sistemas poligeração e

consiste em basicamente três etapas (Grossmann *et al.*, 2000): i) Estabelecimento de uma superestrutura de equipamentos e recursos disponíveis (representação de todas as alternativas possíveis); ii) Formulação de um modelo matemático que represente todas as formas possíveis de operação por meio de variáveis discretas e que utilize variáveis contínuas para representação de fluxos e fundos; e iii) Determinação da solução otimizada, a partir da resolução do modelo matemático. Segundo Carvalho (2011), esta abordagem usa potentes algoritmos matemáticos para resolver o problema de otimização, que pode incluir mudanças nos parâmetros do processo, sua estrutura, ou restrições.

A otimização de sistemas de fornecimento de energia significa buscar um projeto que atenda ao objetivo desejado (maximização da eficiência energética ou redução de perdas, por exemplo). O processo de busca é constricto ao modelo do sistema, que está caracterizado por restrições matemáticas exatas e inexatas. Os centros consumidores, alvo do processo de otimização, podem ser edifícios comerciais ou residenciais, ou até mesmo indústrias. Hospitais tem sido objetivo frequente de otimizações, já que possuem demandas estáveis e expressivas, e funcionam ao longo de todo o ano, 24 horas por dia. Estudos sobre a otimização de sistemas de poligeração em hospitais foram realizados na Itália (ZIHNER, POREDOS, 2006; ARCURI, FLORIO, FRAGIACOMO, 2007), Espanha LOZANO *et al.*, 2009) e Canadá (ROMERO, CARVALHO, MILLAR, 2014a), mas nada havia sido realizado no Brasil até o momento que considerasse não somente a configuração, mas também a operação do sistema, com a inclusão de recursos renováveis e aspectos legais. Estes estudos citados desenvolvem a otimização do sistema de fornecimento de energia a partir de um ponto de vista econômico (minimizando os custos anuais).

## 2.5 Biomassa

A biomassa pode ser definida de maneira geral como qualquer massa ou resíduo orgânico de matéria viva que se encontre na natureza. Em termos energéticos, se caracteriza pela sua capacidade de ser utilizada como combustível ou para a sua produção.

Biomassa é toda a massa de matéria viva, animal ou vegetal, que vive em equilíbrio numa determinada área da superfície terrestre. Do ponto de vista da produção de energia é toda a massa orgânica que pode ser usada como combustível ou para a sua produção. Apesar dos combustíveis fósseis como petróleo, carvão ou gás natural, também sejam derivados de matéria orgânica, precisam de milhares de anos para serem gerados, por isso



não são considerados biomassa pois não são recursos naturais renováveis a curto prazo (NOGUEIRA; RENDEIRO, 2008).

De acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN, 2015), em 2014, a participação de fontes renováveis na Matriz Energética Brasileira manteve-se entre as mais elevadas do mundo (Figura 2.3), com uma pequena redução em relação ao ano de 2013, devido à menor oferta de energia hidráulica. Na lista das fontes que compõem esse percentual, formado pelas renováveis na matriz brasileira, a biomassa de cana de açúcar lidera o ranking em oferta de energia interna no Brasil (15,7%). Atualmente, esse recurso vem sendo cada vez mais utilizado na geração de eletricidade, principalmente em sistemas de cogeração e no suprimento de eletricidade para demandas isoladas da rede elétrica (BRASIL, 2015).

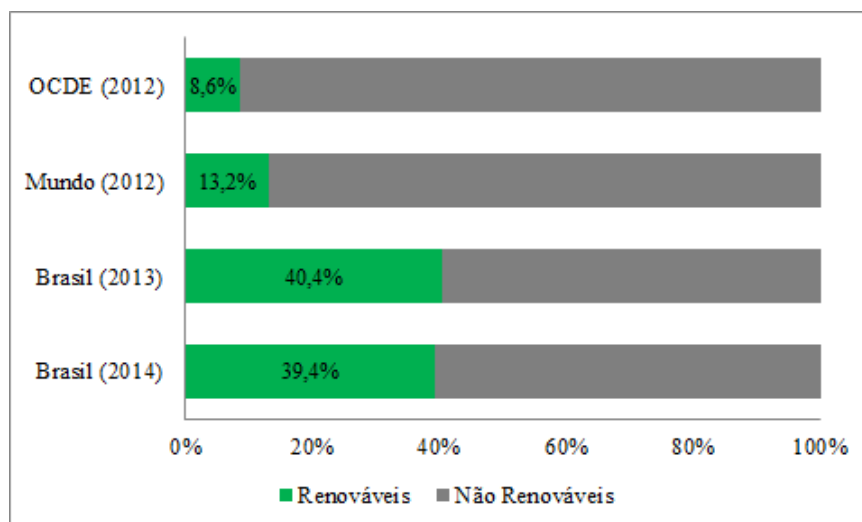


Figura 2.3: Participação de Fontes Renováveis na Matriz Energética Mundial (BEN,2015).

O uso da biomassa tem crescido bastante no Brasil, sobretudo a biomassa residual, proveniente dos resíduos de culturas como cana-de-açúcar, mandioca, soja, sorgo, milho e eucalipto. A mais difundida ainda é a oriunda da cana-de-açúcar, amplamente incentivada pelo governo desde a criação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) no ano de 2002, proveniente da necessidade em se conter as crises energéticas ocorridas no país, provindas da falta de petróleo, carvão e água (BRASIL, 2002).

Mesmo tendo uma natureza diferenciada, pois na sua utilização como combustível, na maioria das vezes, necessita de algum tratamento antes de ser utilizada no processo de

conversão de energia, uma das principais vantagens da biomassa é que também pode ser usada de forma direta, por intermédio da combustão em fornos e caldeiras. Uma dessas aplicações é apresentada no capítulo 5 deste trabalho.

Para aumentar a eficiência do processo e reduzir impactos socioambientais, tem-se desenvolvido e aperfeiçoado tecnologias de conversão mais eficientes, como a gaseificação e a pirólise, também sendo comum a cogeração em sistemas que utilizam a biomassa como fonte energética (BRASIL, 2008). A biomassa pode ser convertida em três tipos de combustíveis, os denominados biocombustíveis:

- a) Biocombustível sólido: o aproveitamento energético é normalmente realizado por combustão direta. A biomassa é recolhida e transportada até o local da sua utilização;
- b) Biocombustível líquido: exemplo do biodiesel, etanol, óleo, obtidos a partir de "culturas energéticas", podem ser utilizados na substituição total ou parcial como combustíveis para veículos motorizados e grupos geradores;
- c) Biocombustível gasoso: a obtenção é feita a partir do processo de gaseificação e pode ser realizado a partir da degradação biológica anaeróbia da matéria orgânica, sendo transformado em biogás, e seu potencial energético é aproveitado através da queima para obtenção de energia térmica ou elétrica.

A utilização do biocombustível sólido, a exemplo da lenha, bagaço de cana de açúcar ou pellets em caldeiras para produção de vapor e água quente em hospitais, a exemplo do que já acontece na Europa, pode reduzir o consumo de energia, eficientizar a instalação e diminuir a emissão de CO<sub>2</sub> ao meio ambiente.

## 2.6 Análise de Ciclo de Vida

Segundo a ABNT (2015), a NBR ISO 14.040, que dispõe sobre a gestão ambiental, a Análise de Ciclo de Vida (ACV) estuda os aspectos ambientais e os impactos potenciais ao longo da vida de um produto (i.e., do “berço ao túmulo”), desde a aquisição da matéria-prima, passando por produção, uso e destinação (seja descarte ou reciclagem). Hinz *et al.* (2006) mensura a ACV como uma metodologia simples, capaz de facilitar a análise dos impactos ambientais gerados pelas atividades de uma empresa. A partir da criação dessa metodologia, é possível verificar não apenas a prevenção da poluição em si, mas uma sistemática confiável que possa ajudar no processo decisório, a fim de gerar o menor

impacto ambiental possível, e inclusive comparar outros métodos na mesma análise (HINZ *et al.*, 2006).

Um bom exemplo de sua aplicação seria a adoção da ACV nos edifícios. A ACV é uma ferramenta de gestão eficaz, por ser capaz de detectar os impactos causados ao meio ambiente em cada etapa de sua vida útil, desde a extração de matéria prima e seu transporte, consumo de energia necessária à fabricação dos materiais e resíduos produzidos, terraplenagens, consumo de água e energia necessários a construção e uso da edificação, demolição e manutenção. De modo a avaliar e propor alternativas que minimizem as cargas ambientais potencialmente produzidas (Projeto EnerBuiLCA, 2012).

A ACV já foi reconhecida pela União Europeia como metodologia estado-da-arte para quantificação de impactos ambientais e incluiu aspectos relacionados no 6º Programa de Ação Ambiental (*6th Environmental Action Programme*, que assegura que legislações ambientais sejam adotadas para atacar a maioria dos desafios ambientais na União Europeia) (EIONET, 2003).

No Brasil, apesar da ACV tratar-se ainda de uma metodologia relativamente recente e pouco conhecida no âmbito gerencial (sendo mais difundida no meio acadêmico), sua utilização na análise e nos critérios de decisão deverá seguir a tendência global. Segundo Barbosa Junior *et al.*(2007, p.4), a ACV caracteriza-se por ser uma forte tentativa de integração da qualidade tecnológica do produto, com a qualidade ambiental, gerando um valor ecológico agregado para o consumidor, representando assim, uma mudança estratégica importante (BARBOSA JUNIOR *et al.*, 2007, p. 4).

A utilização das técnicas de ACV não se limita à quantificação das cargas ambientais de um produto, processo ou serviço, pois ao ser utilizada como uma prática de gestão, permite a comparação de diferentes alternativas, visualizando aquela que apresenta menor impacto ambiental e ajudando o gestor responsável na tomada de decisão. Ferreira (2004, p. 11) adverte que a elaboração de um estudo de ACV necessita normalmente de muitos recursos e demanda um tempo razoavelmente longo. Além disso, as informações desenvolvidas por este estudo devem ser utilizadas como uma componente de um processo de decisão que conta com outras componentes, tais como: o custo e a performance do produto ou processo.

Nesse contexto, agregar os resultados de ACV em um sistema de otimização de recursos energéticos para obtenção de um modelo ambiental ótimo já passa a ser uma realidade, tendo em vista que, nas condições atuais, uma análise puramente econômica não é suficiente. Barbosa Junior *et al.* (2007, p. 3) destacam que no longo prazo, a avaliação do ciclo de vida pode prover mudanças tecnológicas fundamentais na produção e nos produtos, principalmente, devido ao efeito multiplicador ao longo da cadeia de produção, através do uso otimizado de energia e de materiais, bem como de adoção de linhas de reciclagem e de reuso nos processos.

## Capítulo 3

# Artigo 1 - Optimization of Energy Supply and Conversion in a Northeast Brazil Hospital: Use of Photovoltaic Panels

### **Danielle Bandeira de Mello Delgado**

Universidade Federal da Paraíba, Programa de Pós Graduação em Energias Renováveis, Centro de Energias Alternativas e Renováveis. Caixa Postal 5115, Cidade Universitária, João Pessoa - PB, 58059-970. Brasil. +55 83 3216 7268

### **Ricardo Chacartegui**

University of Seville, Higher Technical School of Industrial Engineering. Camino de los Descubrimientos s/n, 41092 Seville, Spain. +34 954 48 72 43 ricardoch@us.es

### **Luiz Moreira Coelho Junior**

Universidade Federal da Paraíba, Programa de Pós Graduação em Energias Renováveis, Centro de Energias Alternativas e Renováveis. Caixa Postal 5115, Cidade Universitária, João Pessoa - PB, 58059-970. Brasil. +55 83 3216 7268

### **Monica Carvalho**

Universidade Federal da Paraíba, Programa de Pós Graduação em Energias Renováveis, Centro de Energias Alternativas e Renováveis. Caixa Postal 5115, Cidade Universitária, João Pessoa - PB, 58059-970. Brasil. +55 83 3216 7268

### **ABSTRACT**

The introduction of new energy sources in an energy supply and conversion system can be analyzed through optimization projects and from information on energy demands and equipments utilized in a specific consumer center. In the energy system presented herein, the following energy demands were considered: electricity, heat, steam and coolth. The consumer was a hospital, located in the city of Northeast Brazil. Commercially available equipment was considered as well as the possible utilization of two renewable energy resources: solar energy and biomass. Considering the installation of 200 photovoltaic solar panels, an optimal system was characterized as a result of the solution of a mixed integer linear program, which considered the annual total cost as the objective function to be minimized. For this scenario, the optimal solution included the utilization of

biomass as an energy source to hot water and steam, with an annual cost 11% lower than the conventional solution.

**Keywords:** polygeneration, photovoltaic solar energy, biomass, optimization, linear programming.

### 3.1 Introduction

Among the several existing possibilities to configure an energy system, the most known and utilized are the traditional system (with conventional equipments that realize single energy conversions to satisfy the energy demands of a specific consumer center), and the system based on energy integration (more elaborated, and makes the best use of energy flows). Polygeneration is defined as the combined production and utilization of two or more energy services, reaching the maximum use of the different energy sources available. Its main advantage is the efficient use of energy, since in polygeneration systems a more detailed study of the relationship generation-consumption is required. Other advantages include reliability and continuity in energy supply, besides a better use, when compared to autonomous systems. Both polygeneration and energy integration are promising tools to reach higher efficiency levels in the use of natural resources, and in the majority of cases, also a reduction in the environmental loads generated (Serra, Lozano, Ramos, Ensinas & Nebra, 2009).

In this context, some consumer centers stand out due to their high energy consumption, and others, such as hospitals, due to the continuous and simultaneous requirements for electricity and heat. Hospitals are, therefore, excellent centers for the potential implementation of polygeneration systems, since comfort conditions as well as electricity, hot water, heating and cooling must be continuously maintained. Recent studies have focused on the optimization of energy supply systems in hospitals (Ziher & Poredos, 2006; Arcuri, Florio & Fragiacomio, 2007; Lozano, Ramos, Carvalho & Serra, 2009; Romero, Carvalho & Millar, 2014a), but the optimal configuration of these systems is still a complex problem, due to the great variety of technological options for the supply and conversion of energy, daily and annual variations in energy demands, and yet variations in the prices and tariffs of energy. According to Shang and Kokossis (2005), the variability present in energy demands requires a project methodology that results in systems that produce efficiently (thermodynamic objective), that are capable of adapting to different

demand and market conditions (operational flexibility), and that also operate with minimum cost.

This study adapts and extends the methodologies established in Romero, Carvalho e Millar (2014a; 2014b), which were based on Mixed Integer Linear Programming (MILP), a tool that has been widely applied to the optimization of energy supply systems (Yokoyama, Hasegama & Ito, 2002; Ren & Gao, 2012). The objective of the study presented herein goes a step further by considering photovoltaic solar energy as an available energy resource in the polygeneration superstructure. The superstructure of an energy system must contain, even if in a redundant manner, all energy resources that are available at the consumer center location. Also are included equipments that realize energy conversions, to guarantee that the energy demands are satisfied, either by a single equipment or by a combination of several (carrying out multiple stages of energy conversion, for example). Local energy resources must be part of the superstructure: in the case of Güssing (Austria), the utilization of local biomass eliminated the dependency on imported electricity (Hofbauer, Reinhard, Klaus, Reinhard & Christian, 2002). For Northeast Brazil, and more specifically the city of João Pessoa, solar energy is an important option. Obviously, an energy resource (local or not) can be part of the superstructure but not of the optimal solution. Due to its importance, factors such as the configuration of the system (type of technology employed and number of installed equipment) and operational strategy (operation mode of equipments throughout the year, including purchase flows of energy resources). Biomass can also be an attractive option, in the form of sugarcane bagasse, coconut straw, coconut shell, among others. Initiatives for the use of civil construction wood residues can also be important origins of biomass.

The energy of the sun can be used for heating as well as for the production of electricity. In Brazil, although still in a very shy manner, the utilization of this type of energy has been increasing each year. Besides economic and environmental advantages, there is a necessity to "ripen" the use of this resource given its high availability in the country, and also to accompany the global trends and favor its utilization in public and economic development politics.

The utilization of photovoltaic solar energy in Brazil nowadays is basically in autonomous systems (islanded), where the installation of distribution lines for electricity is not economically viable (Villalva & Gazoli, 2013). This is also the scenario of utilization

in Northeast Brazil, where many locations still do not present connection to the electric grid. However, after resolution n°482/2012 from the National Electric Energy Agency (In Portuguese: ANEEL), the utilization of photovoltaic solar energy in distributed systems, i.e., connected to the electric grid, tends to grow. Currently there are 150 microgeneration enterprises installed in Brazil, of which 32 are located in Northeast Brazil (ANEEL, 2014).

According to Lozano *et al.* (2009), the most influential factors at the time of installing an energy supply system are the availability of fuels, price of electricity, prices of other fuels and their relationships with the price of electricity, as well as the legal conditions to sell self-generated electricity to the grid. The optimization model proposed herein compares the economic balances for all viable configurations contained in the superstructure of the energy system, and provides both the optimal configuration and optimal operation mode.

## 3.2 Material and Methods

### 3.2.1 Energy Supply and Conversion System

Polygeneration has the main objective of diversifying energy sources, characterized by the combined production of electric and thermal energies, and can include water desalinization (Rubio-Maya, Uche & Martinez, 2011), and production of syngas and syndiesel (Yang, 2013; Romero, Carvalho & Millar, 2014a). The idea is to always optimize the use of the available resources and satisfy the energy demands of a specific consumer center. For the polygeneration system herein presented, only the economic analysis motivates the decision for its installation. Legal and environmental aspects are not considered at this moment, once traditionally, investments in polygeneration always compete with other projects that can prove to be more economic.

Traditionally, thermodynamic and optimization approaches are the two main techniques utilized to synthesize an energy supply system (not considering heuristic models) (Serra *et al.*, 2009). The thermodynamic approach applies thermodynamic analysis to reduce energy losses while providing information on the characteristics of the system. This approach presents the advantage of requiring simpler calculations. Linhoff and Flower (1978) used the thermodynamic approach for the synthesis of heat exchanger networks, maximizing heat recovery, Bejan and Mamut (1999) compiled a comprehensive



assessment of the methodologies of thermodynamic optimization, and Favrat (2013) discussed the strengths and limits of this approach. For the analysis of thermal systems, the most used thermodynamic methodologies are thermoeconomic and pinch analysis.

However, thermodynamic approaches on their own cannot tackle the more holistic considerations needed for modern energy systems (Favrat, 2013) or provide the solution of different classes of problems in a systematic manner (Kim & Han, 2001). Also, thermodynamic methods are not adequate for the optimization of several different structures simultaneously (Tveit, Aaltola, Laukkanen, Laihanen & Fogelholm, 2006). An example of the optimization approach is mathematical programming, which combines binary, integer and continuous variables. Minoux (1986) presents the theory and algorithms for mathematical programming, Biegler and Grossman (2004) also present an overview of the technique along with applications to design and system engineering, and Grossman (2012) presents the advances in mathematical programming models. Mixed Integer Programming (MIP) restricts variables to binary and/or integer values (e.g., for decisions -yes/no-, counting -number of equipment-, and logical relationships). MIP is especially useful for the synthesis of energy supply systems and comprehends three important steps (Grossmann, Caballero & Yeomans, 2000): i) definition of a superstructure (representing all options of equipment and energy resources); ii) elaboration of a mathematical model that includes all operation options in the form of discrete variables, with continuous variables representing flows; and iii) solution of the model, which provides the optimal solution.

### 3.2.2 Consumer Center and Considerations on the Study Case

The consumer center studied is a university hospital, with a total area of 49.000 m<sup>2</sup>, and 420 beds, located in the city of João Pessoa, state of Paraíba, Brazil. The following energy demands were considered; electricity, hot water, steam and coolth. The study extends itself throughout a period of one year, distributed in two representative days (week days and weekend/holidays) per month. Each day is divided into 24 hourly periods, yielding 576 different operation periods throughout the year.

Real electricity data was available, and the calculation of representative energy demands for hot water, heating, and coolth utilized the sequential application of the degree-days method (Erbs, Klein & Beckman, 1983), climate data (CLIMATICUS 4.2,

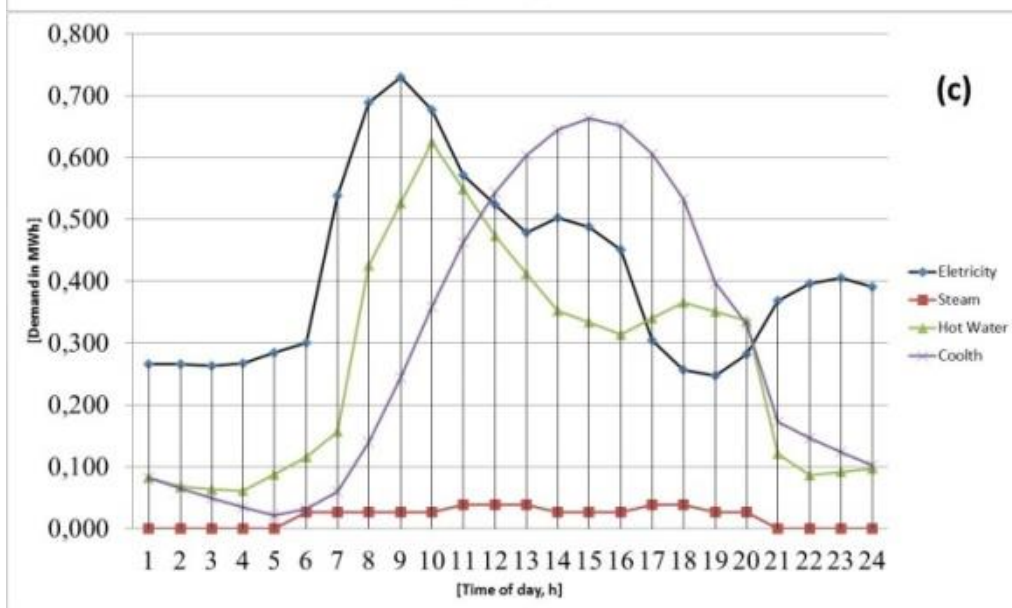
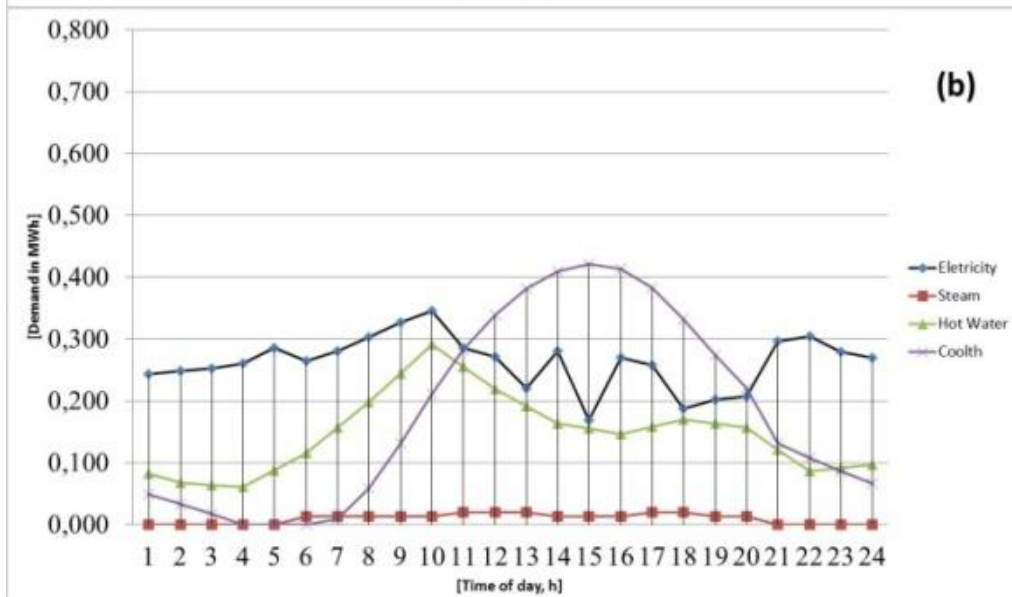
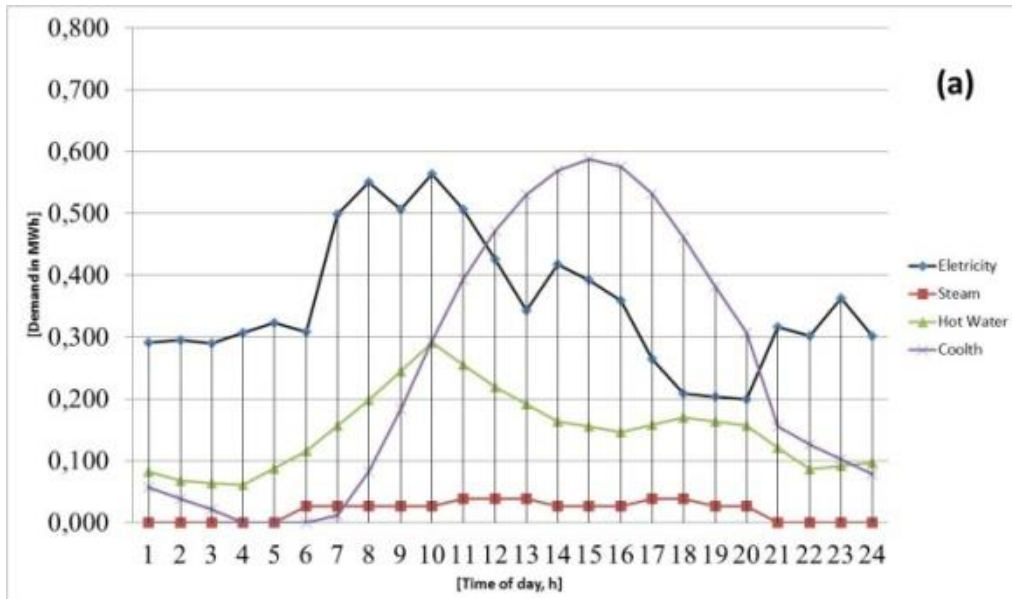
2005), occupation data (Nepote, Monteiro & Hardy, 2009) and data from energy audits (Araújo, 2004). Figure 3.1 a to h show the energy demands for weekdays and weekends/holidays, for a summer month (January), a fall month (April), a winter month (July), and a spring month (October).

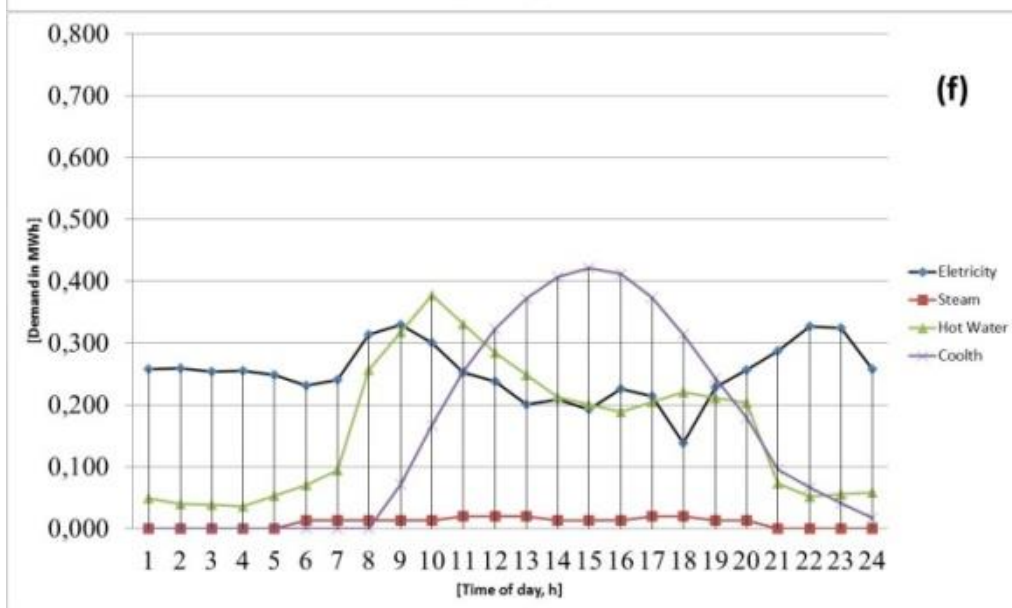
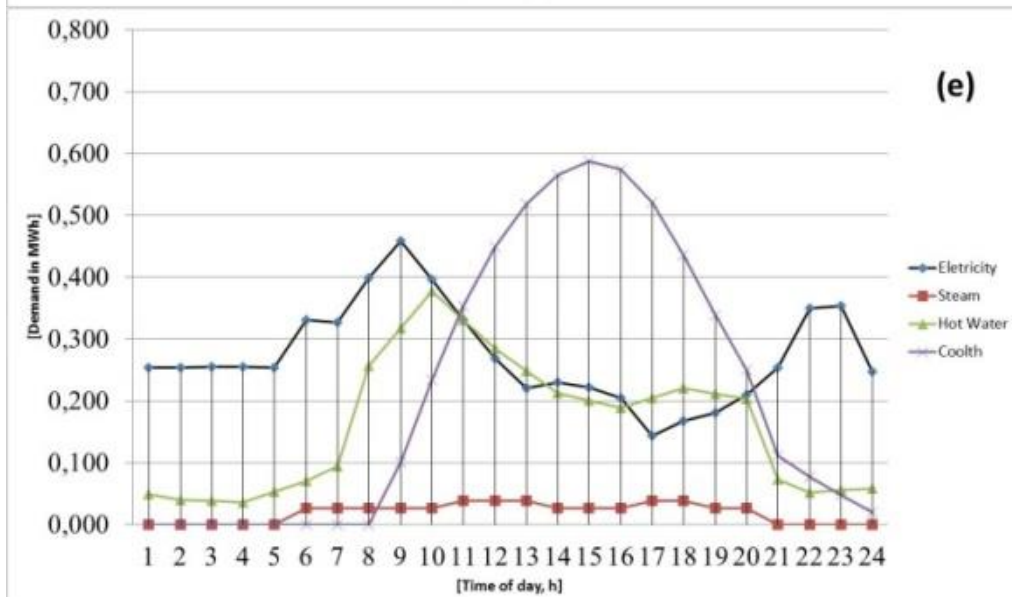
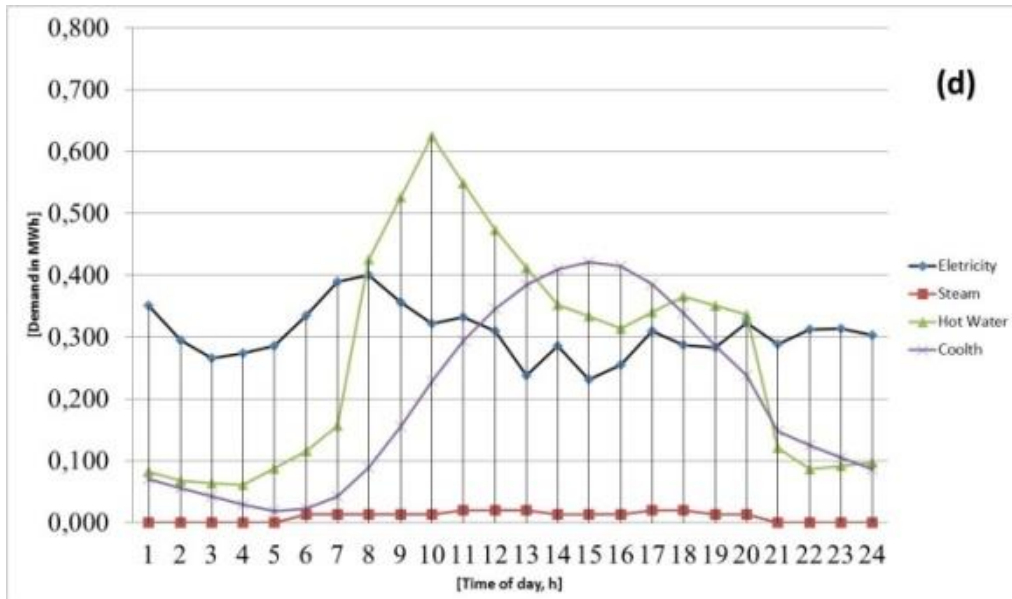
The hospital presents the following annual energy demands: 2791 MWh of electricity, 1947 MWh of hot water, 138 MWh of steam, and 2309 MWh of cooling. Electricity was charged with a blue hour-seasonal tariff, presenting differentiated tariffs for peak and off-peak periods: US\$51.60/MWh for off-peak periods, and within the peak periods (between 18h and 21h) the value is US\$79.60/MWh.

Steam demand was considered constant during the period in which the sterilization central is open, during 6h and 20h, in addition to the steam demand of a hot counter in the restaurant, during lunch and supper times. The hot water demand presents two contributions: laundry (operating between 8h and 18h), and the internal use of the hospital (no interruptions).

The tariff for natural gas (US\$48/MWh – PBGAS, 2013) does not include hourly or seasonal differentiation, and if equipment that is driven by natural gas is installed, the costs already include connection to the distribution network (gaseoducts). The Higher Heating Value (HHV) of natural gas (9,400 kcal / m<sup>3</sup>), along with its tariff for industrial use (US\$ 0.52/ m<sup>3</sup>), were utilized to calculate the cost per MWh (PBGAS, 2013).

The tariff considered for diesel (US\$59.60/MWh) also does not consider hourly or seasonal differentiation, and the costs of installation of equipment driven by diesel include the costs associated with storage.





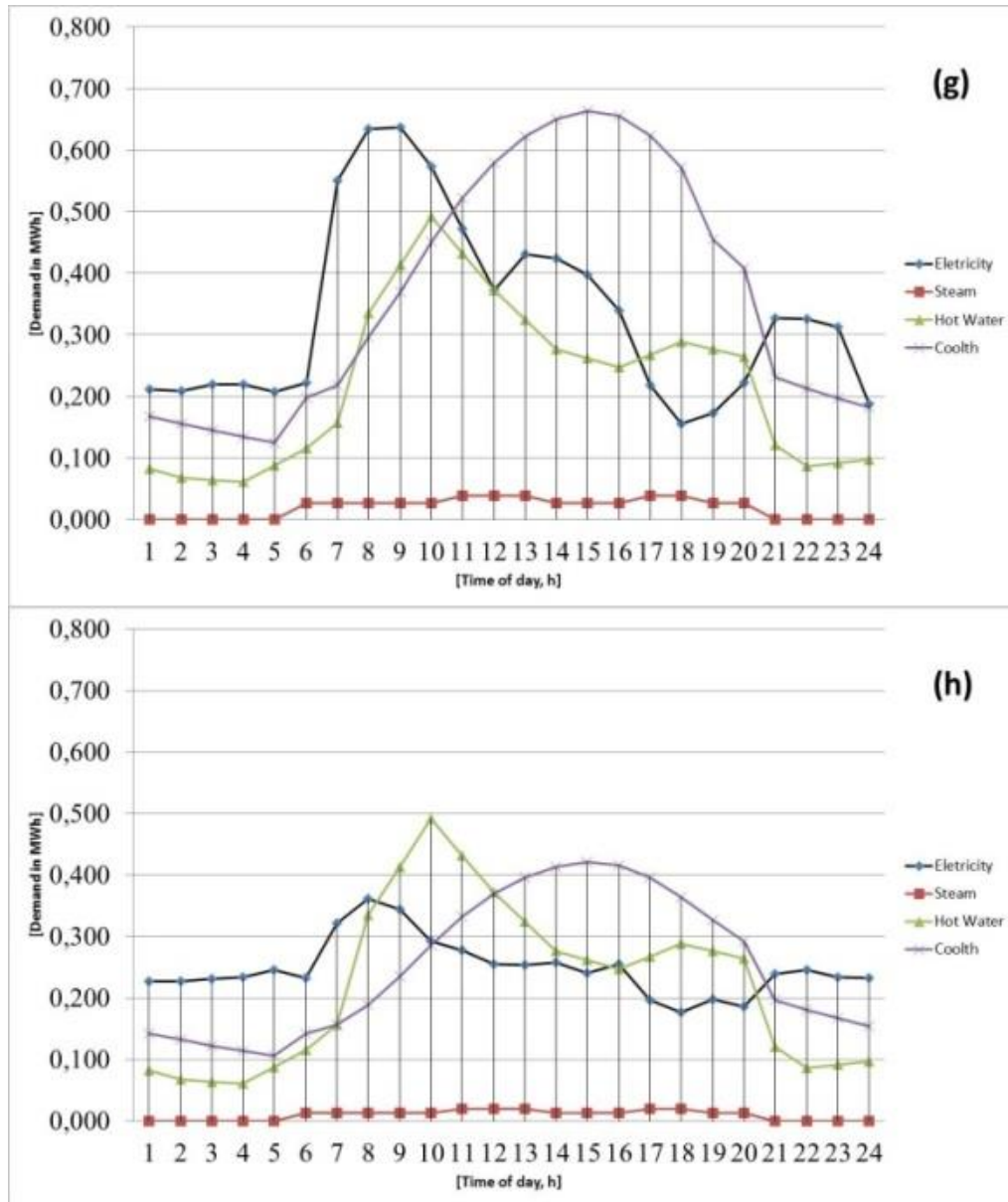


Figure 3.1(a – h): energy demands for weekdays (left) and weekends/holidays (right), for January (a, b) April (c, d), July (e, f) and October (g, h).

The biomass considered herein originates from sugar cane bagasse. The state of Paraíba counts with nine sugar cane plantations that extend to 26 municipalities along the coast line, all located in the proximity of João Pessoa (Nova Cana, 2015). This energy resource was considered basically to meet the hot water and steam demands of the hospital (through boilers). Considering a Lower Heating Value of 3200 kcal/kg (Alfa Laval, 2015), 20 % humidity, and the price of US\$ 48.00 per tonne of sugarcane bagasse (Cana Online, 2015), the final price utilized in the optimization model was US\$ 13.20/MWh for biomass.

### 3.2.3 Photovoltaic Solar Energy

Photovoltaic (PV) solar energy is characterized by the production of electrical current through the direct catchment of solar light. This current is collected and processed by control and conversion devices, and can be stored in batteries or directly utilized in systems connected to the electric grid (Villalva & Gazoli, 2013).

Currently in wide expansion, the use of this type of energy is the fastest-growing around the world. In Brazil, with publication of regulation n° 482 by Brazilian Electricity Regulatory Agency (In Portuguese: ANEEL) (ANEEL, 2012), which establishes the general conditions for distributed microgeneration and minigeneration access to electricity distribution systems, the utilization of PV energy is also in the spotlight. The concepts of microgeneration and minigeneration are presented in regulation n° 482 (ANEEL, 2012): microgeneration is the electricity generation system with installed power under 100 kW and that utilizes hydraulic, solar, wind, biomass, or qualified cogeneration energy, according to ANEEL regulations, and connected to the distribution grid through consumer unit installations. Minigeneration is defined as an electricity generation system with installed power between 100 kW and 1 MW, and that utilizes the same sources indicated in the definition of microgeneration.

The motivation for the use of PV energy arises due to the practicality of its implementation and simple maintenance. Additionally, regulation n°482 (ANEEL, 2012) indicates the possibility of an energy compensation system, where the surplus generated electricity is fed into the distribution grid and registered as energy credits, which can be consumed in up to 36 months.

The studies that propose the utilization of PV solar energy in hospitals are not recent. Between the years of 1987 and 1990, a project that utilized PV solar systems for emergency lighting was applied to the District Hospital of Bawku, in Ghana (Santos & Jabbour, 2013). In 2006, theoretical studies in an Italian hospital investigated the utilization of PV energy in hybrid systems, and an Iranian hospital study demonstrated that the amount of natural gas required to meet the hospital demands could be halved with the incorporation of PV solar energy in a hybrid system that included cogeneration (Santos & Jabbour, 2013).

The proposal of this study is to introduce, within the polygeneration superstructure, PV panels for electricity production, interconnected to the distributed grid. The PV generation system is basically constituted by PV panels and inverters only, as electricity storage will not be considered at this point. Information was obtained from consultation to PV panel (Kyocera, 2014) and inverter (Santerno, 2014) manufacturers. The cost of the system was US\$ 880/panel, already including the cost for the panel, inverter, installation materials, transportation and assembly. The area of the panels is 1.64 m<sup>2</sup>. The costs considered for maintenance are low, and for large systems as in condominiums and hospitals, which require annual maintenance, US\$ 10/m<sup>2</sup> includes cleaning the panels, tightening of connections and oxidation elimination, etc. The energy performance of a PV solar system depends basically on the following factors: available irradiation, area, inclination, and panel efficiency. An incorrect selection of inclination reduces the catchment of solar rays and compromises the production of electricity by the PV module (Villalva & Gazoli, 2013). According to the basic rules presented by the manufacturers, and with the objective of optimizing the production of electricity, the inclination angle of the panels to be installed in the hospital must be 10° since the geographic latitude of the municipality of João Pessoa is 07° S.

#### 3.2.4 Economic Considerations

Table 3.1 shows the technical and economic characteristics of the equipment that belongs to the superstructure (Figure 3.2). Technical information was obtained from manufacturer catalogs, and prices were obtained through direct consultation. On the left side of Table 3.1, the rows indicate the technologies that are potentially installable, and the columns indicate the energy resources available. The coefficient in bold indicates the flow that defines the productive capacity of the equipment, and positive and negative coefficients, indicate, respectively, that an energy flow is either produced or consumed.

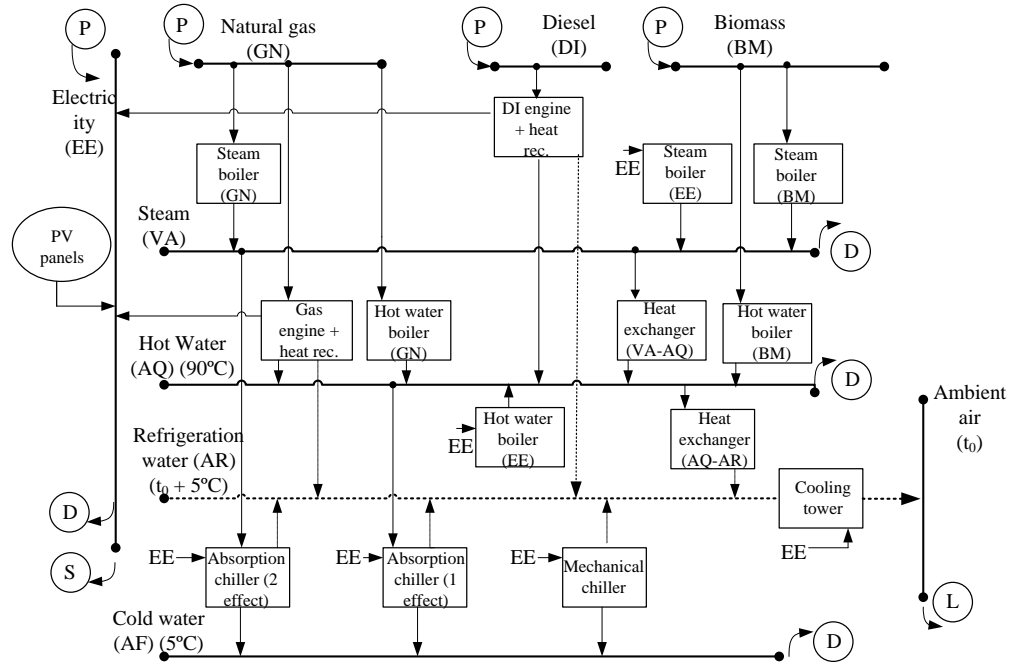


Figure 3.2: Polygeneration superstructure for the hospital.

Table 3.1: Matrix of technical production coefficients and technology data (Romero, Carvalho & Millar, 2014b).

	Technical production coefficients									Equipment		
	GN	BM	DI	VA	AQ	AR	A A	AF	EE	Cost CINV (103 US\$)	Cost O&M (US\$/ MWh)	Nom. Power PNOM (MW)
Gas engine	-2.63				1.10	0.45			1	185.00	6.00	0.41
Diesel engine			-2.66		0.80	0.50			1	90.80	6.00	0.36
Steam boil (GN)	-1.18			1						21.29	0.89	0.30
Steam boil (BM)		-1.40		1						20.40	3.20	0.25
Steam boil (EE)				1					-1.15	20.40	0.89	0.15
Heat exchang (VA-AQ)				-1.10	1					3.56	0.89	0.40
Hot water boil (GN)	-1.22				1					19.72	0.89	0.30
Hot water boil (BM)		-1.25			1					25.00	3.20	0.17
Hot water boil (EE)					1				-1.11	11.28	0.89	0.15
Heat exchang (AQ-AR)					-1.10	1				2.96	0.89	0.40
Absorption chil (2x)				-0.77		1.77		1	-0.01	186.08	4.00	0.46
Absorption chil (1x)					-1.32	2.32		1	-0.01	215.88	4.00	0.49
Mechanical chiller						1.21		1	-0.21	58.00	1.77	0.28
Cooling Tower						-1.00	1		-0.02	11.28	4.00	1.00

The complexity of the problem is perceptible, once all energy demands vary hourly, throughout the day, throughout the year.

For the current economic and financial Brazilian scenario, considering a lifetime of 15 years for the system and an interest rate of 10% per year, a capital recovery factor of 0.13/year was obtained.

A polygeneration system can be designed to operate autonomously, but the possibility of connection to the electric grid can be extremely advantageous for the sale of surplus cogenerated electricity, realizing economic benefits in this way.



The problem to be solved consists of two simultaneous tasks: selection of the combination of technologies (type and power installed) that are capable of meeting the energy demands of the hospital, and establishment of the operation mode for all equipment installed, for each time interval defined.

### 3.2.5 Optimization Model

Once the environment for the installation of the polygeneration system is defined, along with its energy demands, and with information on the technical, economic and legal parameters, the next step is the formulation of the mathematical model. An optimization model was elaborated, based on MILP, and its solution allows for all energy flows to be known. The solution also provides the result of an economic evaluation, selecting the best configuration of the system (type and number of equipment installed) and the operational strategy (how to operate each piece of equipment), obtaining minimum annual cost.

The objective function was selected from an economic perspective, which considers the annual costs: fixed costs (initial investment in equipment) and variable costs (purchase of energy resources to meet the demands, O&M costs). The objective function can be represented in simple algebraic language as:

$$\text{MINIMIZE Annual Costs} = (\text{Fixed Costs}) + (\text{Variable Costs}) \quad (3.1)$$

$$\text{Fixed costs} = (\text{FRC}) \cdot (\text{FCI}) \cdot \left[ \sum_i \text{CINV}_i + \text{PVpanels} \right] \quad (3.2)$$

$$\begin{aligned} \text{Variable costs} = & (\text{Cost of natural gas}) + (\text{Cost of biomass}) + (\text{Cost of diesel}) \\ & + (\text{Cost of electricity}) - (\text{Electricity credits}) \end{aligned} \quad (3.3)$$

The total investment cost ( $\text{CINV}_i$ ) is the number of equipment installed multiplied by the individual cost. FRC is the capital recovery factor, introduced previously, and FCI is an indirect cost factor that agglutinates engineering, transportation, installation, supervision, service, and contingency costs, resulting in 15% of the investment cost in equipment.

The possibilities of interaction of the polygeneration system with the economic environment can be represented by a binary matrix (0 = no, 1 = yes) with indicators for the possibilities of purchase (INDCOM), demand (INDDEM), sale (INDVEN) and waste

(INDDDES, e.g., in the case excess heat is evacuated) for each of the energy resources available  $j$ :

INDCOM	INDDEM	INDVEN	INDDDES	
1	0	0	0	(natural gas, $j=1$ )
0	1	0	0	(steam, $j=2$ )
0	1	0	0	(hot water, $j=3$ )
0	0	0	0	(refrigeration water, $j=4$ )
0	0	0	1	(ambient air, $j=5$ )
0	1	0	0	(cold water, $j=6$ )
1	1	1	0	(electricity, $j=7$ )
1	1	0	0	(diesel, $j=8$ )
1	1	0	0	(biomass, $j=9$ )

(3.4)

For each time interval, the production of energy is restricted to the installed capacity of equipments and an energy balance must be fulfilled for each utility  $j$  (energy resource):

$$\text{Production}_j - \text{Consumption}_j + \text{Purchase}_j - \text{Sale}_j - \text{Demand}_j = 0 \quad (3.5)$$

Capacity limits, production restrictions, and balance equations were enforced in the optimization model.

Capacity limits: For each period  $(d,h)$  and for each technology  $i$

$$\text{POE}(i, d, h) \leq \text{NIN}(i) \cdot P_{\text{nom}}(i) \quad (3.6)$$

where  $\text{POE}(i,d,h)$  is the energy production of technology  $i$  in the period  $(d,h)$ , and  $P_{\text{nom}}$  is the nominal power of the equipment.

Production restrictions: For each period  $(d,h)$  and for cogeneration modules, the production of energy was restricted to:

$$\text{POE}(i, d, h) = \text{NES}(i, d, h) \cdot P_{\text{nom}}(i) \quad \text{with } \text{NOP}(i, d, h) \in \{0, 1, \dots, \text{NEI}(i)\} \quad (3.7)$$

where  $NES(i,d,h)$  is the number of operational equipment of technology  $i$  in the period  $(d,h)$ . For each technology  $i$ , For each utility  $j$ ,

$$UI(i,j,d,h) = PC(i,j) \cdot POE(i,d,h) \quad (3.8)$$

where  $UI(i,j,d,h)$  is the energy flow of utility  $j$  interchanged with technology  $i$  in the period  $(d,h)$  and  $PC(i,j)$  is the absolute value of the production coefficient (Table 6.21).

Balance equations: For each period  $(d,h)$  and for each utility  $j$ :

$$Prod(j,d,h) - Cons(j,d,h) + Imp(j,d,h) - Exp(j,d,h) - Waste(j,d,h) - Demand(j,d,h) = 0 \quad (3.9)$$

$$Prod(j,d,h) = \sum_i X(i,j,d,h) \cdot YTUP(i,j) \quad \text{with } YTUP(i,j) \in \{0,1\} \quad (3.10)$$

$$Cons(j,d,h) = \sum_i X(i,j,d,h) \cdot YTUC(i,j) \quad \text{with } YTUC(i,j) \in \{0,1\} \quad (3.11)$$

$$Imp(j,d,h) \leq YUI(j) \cdot (Cons(j,d,h) + D(j,d,h)) \quad \text{with } YUI(j) \in \{0,1\} \quad (3.12)$$

$$Exp(j,d,h) \leq YUE(j) \cdot Prod(j,d,h) \quad \text{with } YUE(j) \in \{0,1\} \quad (3.13)$$

$$Waste(j,d,h) \leq YUW(j) \cdot Prod(j,d,h) \quad \text{with } YUW(j) \in \{0,1\} \quad (3.14)$$

$$Demand(j,d,h) \leq YUD(j) \cdot (Prod(j,d,h) + P(j,d,h)) \quad \text{with } YUD(j) \in \{0,1\} \quad (3.15)$$

$YTUP(i,j)$  was 1 when technology  $i$  produced utility  $j$ .  $YTUC(i,j)$  was 1 when technology  $i$  consumed utility  $j$ . Production (Prod), and Consumption (Cons) corresponded to internal utility flows. Imports (Imp), Exports (Exp), Waste and Demand correspond to the utility flows interchanged between the energy system and the market environment. Binary variables  $YUI(j)$ ,  $YUE(j)$ ,  $YUW(j)$  and  $YUD(j)$  indicated, respectively, the possibility of such interchanges.

The novelty introduced herein is the introduction of PV panels in the superstructure, for the production of electricity. Equation (3.5) is modified only for electricity, including a term that represents the Net Absorbed Radiation (NAR) by the PV panels. Equation (3.16) contemplated the possibility that the electricity from the PV panels (EEPV) can be utilized in the polygeneration system:

For  $j=7$ , and for each hour, and each day:

$$Production_j - Consumption_j + Purchase_j - Sale_j - Demand_j + EEPV = 0 \quad (3.16)$$

$$EEPV = NPS \cdot A \cdot (R / 1000) \cdot \text{eff} \quad (3.17)$$

$$NPS \leq NPV \quad (3.18)$$

Equation (3.17) defines the electricity produced by PV panels, originated from the radiation absorbed during each hour, for each day, by the panels, where  $A$  [ $m^2$ ] represents the surface of each panel/  $eff$  is the efficiency of each panel (manufacturer data)/  $Rad$  [ $Wh/m^2$ ,  $J/m^2$ ] is the global radiation per surface unit in horizontal plane, due to the geographic location;  $NPV$  is the number of PV panels installed, and  $NPS$  is the number of active PV panels for each time interval considered in the balance equations.  $NPS$  is used as a restriction in Equation (3.18) to represent the degree of utilization of the panels.

Utilizing all energy forms available in the superstructure, as well as individual or multiple energy conversions, the optimization model compares all the possible ways to meet the energy demands of the hospital. This is carried out hour-by-hour, for each day of the year, obtaining a total annual cost (configuration and operational mode). Therefore, all economic balances for all viable configurations contained in the polygeneration superstructure are compared, yielding the minimum annual cost.

### 3.3 Results

The optimization model contains 124.842 variables, of which 1756 are integers. The model presents 81.051 restrictions, and was solved after 19.926 iterations. The solution of the optimization model, including the mandatory installation of 200 PV panels, provides the data shown in Table 3.2. Table 3.2 also shows the result of another optimization, referred to as reference system, where only conventional equipment is utilized to meet the energy demands of the hospital. The possibilities of cogeneration and utilization of biomass are not included in the conventional system.

Table 3.2: Minimum annual cost for the polygeneration system with 200 PV panels installed.

	Economic Optimal		Reference system*	
<b>Composition of system</b>	Número (Installed power)		Number (Installed Power)	
Gas engine	0 (0 MW)		- (0 MW)	
Diesel engine	0 (0 MW)		- (0 MW)	
Steam boiler (GN)	0 (0 MW)		1 (0.300 MW)	
Steam boiler (BM)	1 (0.250 MW)		0 (0 MW)	
Steam boiler (EE)	0 (0 MW)		0 (0 MW)	
Heat exchaner (VA-AQ)	1 (0.400 MW)		1 (0.400 MW)	
Hot water boiler (GN)	0 (0 MW)		1 (0.300 MW)	
Hot water boiler (BM)	2 (0.340 MW)		0 (0 MW)	
Hot water boiler (EE)	1 (0.150 MW)		1 (0.150 MW)	
Heat exchanger (AQ-AR)	0 (0 MW)		0 (0 MW)	
Double-effect absorption chiller	0 (0 MW)		0 (0 MW)	
Single-effect absorption chiller	0 (0 MW)		0 (0 MW)	
Mechanical chiller	3 (0.810 MW)		3 (0.810 MW)	
Cooling tower	1 (1.000 MW)		1 (1.000 MW)	
Photovoltaic panels	200 units		--	
Electricity imports	3244 MWh/year		4281 MWh/year	
Electricity produced by PV panels	129 MWh/year		--	
Electricity credits	--		--	
Natural gas imports	--		1528 MWh/year	
Diesel imports	--		--	
Biomass imports	2663 MWh/year		--	
Initial investment in equipment	US\$	587.089	US\$	374.670
Annual cost of electricity imports	US\$/year	180.489	US\$/year	233.979
Annual credit with electricity exports	US\$/year	--	US\$/year	--
Annual cost of natural gas imports	US\$/year	--	US\$/year	73.335
Annual cost of diesel imports	US\$/year	--	US\$/year	--
Annual cost of biomass imports	US\$/year	35.150	US\$/year	--
Operation and Maintenance costs	US\$/year	21.813	US\$/year	16.716
Annual cost of equipment	US\$/year	76.322	US\$/year	48.707
<b>TOTAL annual cost</b>	US\$/year	331.774	US\$/year	372.758

The economic optimal presents a lower annual total cost, when compared to the reference system (10.99% lower). When analyzing the initial investment in equipment, a higher value is verified due to the installation of PV panels and biomass boilers (more expensive than traditional boilers). However, this value is compensated by 22.86% less electricity being imported from the grid.

The production of only 129 MWh/year of electricity through PV panels does not allow for the credit compensation due to minigeneration, as foreseen by legal constraints (regulation n°482 - ANEEL, 2012). For the amount of panels installed, no surplus electricity is fed into the grid. This production can be considered inexpressive if the high investment costs are considered for the implementation of this type of technology.

In the optimal system, the steam demand is satisfied by a biomass steam boiler, and excess heat goes into a heat exchanger, to meet the demands of hot water. The remaining hot water demand is met by two biomass hot water boilers plus an electricity boiler. All coolth originates from mechanical chillers. Diesel and natural gas were not utilized in the reference system neither in the optimal system. No absorption chillers were installed. The

amount of heat originated from these mechanical chillers is entirely evacuated through the cooling towers.

Among the results presented for the optimal configuration, the purchase of biomass (2663 MWh/year) for utilization in boilers must be highlighted, as the low purchase price makes the use of biomass technologies more attractive from an economic point of view.

### 3.3.1 Others Results

#### 3.3.1.1 Variation of interest rates and mandatory installation of 200 panels

A sensitivity analysis was carried out to verify the influence of the interest rates on the configurations obtained by the optimization model. The base interest rate was 10%, which was used to build Table 3.3. When the interest rates were decreased to 8% and 6%, there was no difference in the solution provided by the optimization model (same results as Table 3). When the interest rate dropped to 4%, the electric boiler was not installed and in its place, an additional biomass boiler was installed for the production of hot water. However, considering the reality of the Brazilian market in 2014, with inflation rates of 6.75% and interest rates between 10-11%, using a 4% interest rate does not reflect at all the reality of the market.

#### 3.3.1.2 Free optimization with different investment costs

This sensitivity analysis removed the mandatory installation of 200 PV panels, and varied the capital cost for the PV system. The results obtained from solving the optimization model are shown in Table 3.3.

Table 3.3: Cost for the panels and economic minimum.

Investment costs for PV panels	Configuration of the system: installation of PV panels
Base case: US\$ 880/unit	no installation of PV panels
US\$ 440/unit	no installation of PV panels
US\$ 256/unit*	830 panels installed, but no electricity exports
US\$ 220/unit	1000 panels installed**, but no electricity exports

\* Starting point for installation of PV panels

\*\* A maximum amount of 1000 PV panels was considered as a restriction.

It is observed that the cost of photovoltaic system deployment is high, preventing the compensation of the generated energy, along the lines of resolution n° 482 da ANEEL. However, even with the reduction of 75% of the initial investment cost for installation of

photovoltaic solar panels, the optimal solution did not export electricity to the electric grid because the cost is still higher than the credits offered by the current legislation.

The legislation in force is comprehensive regarding the implementation of renewable sources for distributed generation. However, given the results obtained herein for the free optimization of the system, the use of other resources should be considered (e.g., biomass).

A new analysis was carried out by inserting in optimizing the data provided by the Energy Research Company (In Portuguese: EPE) (BRAZIL, 2014) in technique note DEA 26/14, which deals with the evaluation of energy efficiency and distributed generation to the next 10 years (from 2014 to 2023), considering the following information:

- Real discount rate of 6 % a.a;
- Life - panels - 20 years and inverters - 10 years;
- Operation and maintenance costs - 1% of the initial investment per annum.

The planned configuration initially remained, and even from the perspective of data reported by the company, the installation of photovoltaic solar panels for consumer unit object of this study is not attractive.

#### 3.3.1.3 Use of biomass for power generation

As the economic optimum signaled by the use of biomass as an energy resource due to its low cost, compared to other resources available, it was decided to insert in the hospital's superstructure, a power generator biomass to carry out a new analysis.

The data used for the generator were specified for the GASEIFAMAZ (COELHO *et al.*, 2006) compared to existing biomass gasification technologies in Brazil and abroad. The evaluated systems are a gasifier system in conjunction with an internal combustion engine to generate electric energy.

Fuel prices have been updated, as the local reality, and it was considered cost of diesel, US\$ 59.60 / MWh and the cost of biomass (bagasse), US\$ 20.87/MWh. The life of equipment is five years. A new table (Table 3.4) of technical coefficients was obtained:

Table 3.4: Matrix of technical production coefficients and technology data Rótulo11 with biomass engine

	Technical production coefficients										Equipment		
	GN	BM	DI	VA	AQ	AR	AA	AF	EE	Cost CINV (10 <sup>3</sup> US\$)	Cost O&M (US\$/ MWh)	Nom. Power PNOM (MW)	
Biomass engine		3.5	1.5						<b>1</b>	40	6.00	2.00	
Gas engine	-2.63				1.10	0.45			<b>1</b>	185.00	6.00	0.41	
Diesel engine			-2.66		0.80	0.50			<b>1</b>	90.80	6.00	0.36	
Steam boil (GN)	-1.18			<b>1</b>						21.29	0.89	0.30	
Steam boil (BM)		-1.40		<b>1</b>						20.40	3.20	0.25	
Steam boil (EE)				<b>1</b>				-1.15		20.40	0.89	0.15	
Heat exchang (VA-AQ)				-1.10	<b>1</b>					3.56	0.89	0.40	
Hot water boil (GN)	-1.22				<b>1</b>					19.72	0.89	0.30	
Hot water boil (BM)		-1.25			<b>1</b>					25.00	3.20	0.17	
Hot water boil (EE)					<b>1</b>			-1.11		11.28	0.89	0.15	
Heat exchang (AQ-AR)					-1.10	<b>1</b>				2.96	0.89	0.40	
Absorption chil (2x)				-0.77		1.77		<b>1</b>	-0.01	186.08	4.00	0.46	
Absorption chil (1x)					-1.32	2.32		<b>1</b>	-0.01	215.88	4.00	0.49	
Mechanical chiller						1.21		<b>1</b>	-0.21	58.00	1.77	0.28	
Cooling Tower						-1.00	<b>1</b>		-0.02	11.28	4.00	1.00	

The result of the optimization considering the inclusion of biomass generator are in Table 3.5

Table 3.5: Minimum annual cost for the polygeneration system with biomass engine.

	Economic Optimal –Biomass		Economic Optimal -PV	
<b>Composition of system</b>	Número (Installed power)		Number (Installed Power)	
Biomass engine	0 (0 MW)		0 (0 MW)	
Gas engine	0 (0 MW)		0 (0 MW)	
Diesel engine	0 (0 MW)		0 (0 MW)	
Steam boiler (GN)	0 (0 MW)		0 (0 MW)	
Steam boiler (BM)	1 (0.250 MW)		1 (0.250 MW)	
Steam boiler (EE)	0 (0 MW)		0 (0 MW)	
Heat exchaner (VA-AQ)	1 (0.400 MW)		1 (0.400 MW)	
Hot water boiler (GN)	0 (0 MW)		0 (0 MW)	
Hot water boiler (BM)	2 (0.340 MW)		2 (0.340 MW)	
Hot water boiler (EE)	1 (0.150 MW)		1 (0.150 MW)	
Heat exchanger (AQ-AR)	0 (0 MW)		0 (0 MW)	
Double-effect absorption chiller	0 (0 MW)		0 (0 MW)	
Single-effect absorption chiller	0 (0 MW)		0 (0 MW)	
Mechanical chiller	3 (0.810 MW)		3 (0.810 MW)	
Cooling tower	1 (1.000 MW)		1 (1.000 MW)	
Photovoltaic panels			200 units	
Electricity imports	3373 MWh/ano		3244 MWh/year	
Electricity produced by PV panels	--		129 MWh/year	
Electricity credits	--		--	
Natural gas imports	--		--	
Diesel imports	--		--	
Biomass imports	2663 MWh/year		2663 MWh/year	
Initial investment in equipment	US\$	410.918	US\$	587.089
Annual cost of electricity imports	US\$/year	187.155	US\$/year	180.489
Annual credit with electricity exports	US\$/year	--	US\$/year	--
Annual cost of natural gas imports	US\$/year	--	US\$/year	--
Annual cost of diesel imports	US\$/year	--	US\$/year	--
Annual cost of biomass imports	US\$/year	55.355	US\$/year	35.150
Operation and Maintenance costs	US\$/year	21.813	US\$/year	21.813
Annual cost of equipment**	US\$/year	53,419	US\$/year	76.322
TOTAL annual cost	US\$/year	317.776	US\$/year	331.774

Although the total annual cost was 4.21% lower without the use of photovoltaic panels and with biomass for power generation, it can be seen from this analysis that the



generator insertion of the biomass option is unattractive since the great economic configuration the equipment is not installed.

### 3.4 Conclusions

The installation of new energy systems and the optimization of these projects require a real and comprehensive analysis from different viewpoints: technical, economic, environmental, etc., and should also reflect, as closely as possible, the actual conditions of use. The energy system that allows the hospital to meet the energy demands prioritized only the economic aspect, seeking the minimum total annual cost.

This work presents the optimal configuration for a polygeneration system, using renewable sources (solar photovoltaic and biomass). An analysis of the economic impact caused by the incorporation of these sources was also presented. It was observed that for current conditions (available number of photovoltaic panels: 200), the installation is not attractive from an economic perspective. The high cost of implementation, in addition to low production of electricity, do not enable the hospital to take advantage of this resource to realize economic benefits. The optimal solution, however, suggested the installation of biomass boilers for better utilization of this energy resource, given its low cost.

In general, low variability was observed in the configurations obtained, in which the cooling demand was always met by mechanical chillers.

As a suggestion for extending this work, the introduction of more equipment in the superstructure can be considered, such as biomass turbines, which can take advantage of the low price of the resource for electricity or steam generation. Sensitivity analyses can be carried out by varying economic conditions (factor amortization), price of biomass (including introducing a constraint on consumption, simulating a finite daily or monthly stock), and initial investment in solar panels (simulating a government grant for example). It is also interesting to perform the optimization of the system from an environmental point of view, using the technique of Life Cycle Analysis (LCA), and verify what setup and operation is obtained when the objective function considers the minimization of environmental impacts.

O texto deste artigo difere ligeiramente da versão submetida ao “23<sup>rd</sup> *International Congress of Mechanical Engineering*” (COBEM), devido às observações e sugestões apresentadas pela banca examinadora.

### 3.5 References

ALFA LAVAL. *Alfa Laval* Retrieved March 09, 2015, from <http://www.aalborg-industries.com.br/downloads/poder-calorifico-inf.pdf>

ARAÚJO, M. M. D(2004). *Methodological contribution for the exergetic diagnosis of thermal and electric systems - study case at the Lauro Wanderley University Hospital*. MSc. dissertation, Department of Mechanical Engineering, Federal University of Paraíba, João Pessoa, Brazil. (In Portuguese)

BEJAN& MAMUT (1999) *Thermodynamic Optimization of Complex Energy Systems* Retrieved March 19, 2015, from <http://www.springer.com/gp/book/9780792357254>

BIEGLER LT & GROSSMAN IE (2004). *Retrospective on optimization. Computers and Chemical Engineering*. Vol.28 pp. 1169-1218.

BRAZIL, ANEEL. *Normative Resolution N° 482, 17 April 2012*. Establishes the general conditions for the access of distributed micro- and mini- generation to the electricity distribution system, electricity compensation system, and other matters Retrieved August 04, 2014, from <http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. (In Portuguese)

BRAZIL, ANEEL. *Generation information database*. Retrieved August 06, 2014, from <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/AgenteGeracao/ListaAgentes.asp?destino=9> (In Portuguese)

BRAZIL, EPE. TECHNICAL NOTE DEA 26/14 *Evaluation of Energy Efficiency and Generation distributed for the next 10 years (2014-2023 )* (In Portuguese)

CANA ONLINE. *The first digital journal for the Sugar and ethanol industry*. Retrieved March 09, 2015, from <http://www.canaonline.com.br/conteudo/compreco-em-alta-aumenta-ritmo-de-geracao-nas-usinas-de-biomassa.html#.VP3Ve3zF9GQ> (In Portuguese)

CLIMATICUS 4.2. *Climatic database. Project strategies for 58 Brazilian cities*. INMET1961-1990 database. Beta version. Faculty of Architecture and Urbanization, University of São Paulo, Technology department, Laboratory of environmental comfort and energy efficiency, 2005. Retrieved November 29, 2013,

from [www.usp.br/fau/pesquisa/laboratorios/labaut/conforto/Climaticus\\_4\\_2.xls](http://www.usp.br/fau/pesquisa/laboratorios/labaut/conforto/Climaticus_4_2.xls) (In Portuguese)

COELHO, S.T, VELÁZQUEZ, G.M.S, SANDRA A.S, LORA A.B. Electricity Generation Systems Using Biomass Gasification in Natura in Communities Isolated in Amazon Region - GASEIBRAS PROJECT. Retrieved July 18, 2015, from <http://www.proceedings.scielo.br/pdf/agrener/n6v1/068.pdf>. (In Portuguese)

ERBS, D.G., KIEIN, S.A. & BECKMAN, W.A. (1983). *Estimation of degree-days and ambient temperature bin data from monthly-average temperatures*, ASHARE Journal, vol. 25, n. 6, pp. 60-65.

FAVRAT (2013) *Thermodynamics and the Optimization of Energy Systems: Strengths and Limits*. Paper presented at 12th Joint European Thermodynamics Conference, Brescia, Italy.

GROSSMAN IE, Caballero JA, & Yeomans H. (2000) *Advances in mathematical programming for the synthesis of process systems*. Latin American Applied Research. Vol. 30 I4 pp. 263–284.

GROSSMAN (2012). *Advances in mathematical programming models for enterprise-wide optimization*. Computers & Chemical Engineering. Vol. 47 pp 2-18

HASEGAWA, Y. & ITO, K. (2002). *A MILP decomposition approach to large scale optimization in structural design of energy supply systems*. Energy Conversion and Management, vol. 43, n. 6, p. 771-790.

HOFBAUER, H., REINHARD, R., KLAUS, B., REINHARD, K., CHRISTIAN, A. *Biomass CHP Plant Güssing – A Success Story*, Strasbourg, France, September, 2002. Retrieved August 09, 2014, from <http://www.members.aon.at/biomasse/strasbourg.pdf>.

KIM J.H & HAN C. (2001) Short-Term Multiperiod Optimal Planning of Utility Systems Using Heuristics and Dynamic Programming. Ind. Eng. Chem. Vol. 40, pp. 1928-1938.

KYOCERA. *Kyocera Brasil*. Retrieved July 30, 2014, from <http://www.kyocera.com.br/>

- LINHOFF& FLOWER (1978) *Synthesis of heat exchanger networks: I. Systematic generation of energy optimal networks*. Aiche Journal. Vol. 24. I4 pp 633-642
- LOZANO, M. A., RAMOS, J. C., CARVALHO, M., SERRA, L.M., 2009. *Structure optimization of energy supply systems in tertiary sector buildings*, Energy and Buildings, vol. 41, n. 10, pp. 1063-1075
- M. MINOUX. *Mathematical Programming: Theory and Algorithms*. John Wiley and Sons,1986.
- NEPOTE, M. H. A., MONTEIRO, I. U& HARDY, E.(2009). *Association between operational indices and occupation rates of a general surgery center*, Latino-Am. Enfermagem [online] Journal, vol. 17, n.4. (In Portuguese)
- NOVA CANA. *Nova Cana*. Retrieved March 09, 2015, from <http://www.novacana.com/usinas-brasil/nordeste/paraiba/> (In Portuguese)
- PBGÁS – Companhia Paraibana de Gás. Tariffs. Retrieved December 24, 2013, from [http://www.pbgas.com.br/?page\\_id=1477](http://www.pbgas.com.br/?page_id=1477) (In Portuguese)
- RETSCREEN – *Natural Resources Canada* (2007). Solar Water Heating Project Analysis. Clean Energy Project Analysis Course.
- ROMERO, A., CARVALHO, M., & MILLAR, D. L. (2014a) *Application of a polygeneration optimization technique for a hospital in Northern Ontario*. *Transactions of the Canadian Society of Mechanical Engineering*, vol. 1, 2014.
- ROMERO, A., CARVALHO, M., & MILLAR, D. L. (2014b, May) *Biomass and solar thermal energy in the synthesis and optimization of a polygeneration system*. Paper presented at the Congresso Brasileiro de Energia Solar, Recife, PE. (In Portuguese)
- RUBIO-MAYA, C., Uche, J.& Martinez, A.(2011) *Sequential optimization of a polygeneration plant*. *Energy Conversion and Management*, vol. 52, n. 8–9, p. 2861–2869, 2011.
- SANTERNO. *Santerno Carraro Group-Giving energy more value*. Retrieved July 30, 2014, from <http://www.santerno.com.br/>

- SANTOS, B.J & JABBOUR, C.J.C.(2013) *Adoption of photovoltaic solar energy in hospitals: literature review and international experiences*. Saúde Soc. São Paulo, v. 22, n. 3, p. 972–977. (In Portuguese)
- SERRA, L.M., LOZANO, M.A., RAMOS, J., ENSINAS, A., NEBRA, S.A. (2009) *Polygeneration and efficient use of natural resources*. Energy, vol. 34, pp. 575-586.
- SHANG, Z.& KOKOSSIS, A.(2005) *A systematic approach to the synthesis and design of flexible utility systems*. Chemical Engineering Science, vol. 60, p. 4431-4451.
- TAVARES, C. (2009) *Proposta de regulamento de desempenho termo-energético de edificações para a cidade de João Pessoa – PB. Uma Aplicação à Estação Ciência, Cultura e Artes*. Unpublished master dissertation: UFPB,João Pessoa, PB. Retrieved February 17, 2014, from [http://bdtd.biblioteca.ufpb.br/tde\\_busca/arquivo.php?codArquivo=226](http://bdtd.biblioteca.ufpb.br/tde_busca/arquivo.php?codArquivo=226)
- Tuma. (2013) Solar heater for a hospital. Large solar heating works for hospitals. Retrieved December 24, 2013, from <http://www.aquecimentosolartuma.com.br/hospitais> (In Portuguese)
- TVEIT TM, AALTOLA J, LAUKKANEN T, LAIHANEN M, & FOGELHOLM CJ.(2006) *A framework for local and regional energy system integration between industry and municipalities-Case study UPM Kymmene Kaukas*. Energy.Vol. 31 pp. 1826-1839.
- VILLALVA, M & GAZOLI, J.(2013) *Solar Photovoltaic Energy - Concepts and Applications*. São Paulo, SP: Editora Érica. (In Portuguese)
- YANG C.(2013) *Optimal design and operation of energy polygeneration systems. PhD thesis MIT, Massachussets*. Retrieved August 07, 2014, from <http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/79192>
- YOKOYAMA, R., HASEGAWA, Y.& ITO, K..(2002). *A MILP decomposition approach to large scale optimization in structural design of energy supply systems*. Energy Conversion and Management, vol. 43, n. 6, pp. 771-790.
- ZIHER, D.& POREDOS, A.(2006) *Economics of a trigeneration system in a hospital*. Applied Thermal Engineering, vol. 26, n. 7, pp. 680-687.

## Capítulo 4

### Artigo 2 - Custo Médio de produção e Modelo de Negócio para utilização de Biomassa em Caldeiras de um sistema de poligeração de um hospital do Nordeste Brasileiro

#### **Danielle Bandeira de Mello Delgado**

Universidade Federal da Paraíba, Programa de Pós Graduação em Energias Renováveis, Centro de Energias Alternativas e Renováveis. Caixa Postal 5115, Cidade Universitária, João Pessoa - PB, 58059-970. Brasil. +55 83 3216 7268

#### **Monica Carvalho**

Universidade Federal da Paraíba, Programa de Pós Graduação em Energias Renováveis, Centro de Energias Alternativas e Renováveis. Caixa Postal 5115, Cidade Universitária, João Pessoa - PB, 58059-970. Brasil. +55 83 3216 7268

#### **Luiz Moreira Coelho Junior**

Universidade Federal da Paraíba, Programa de Pós Graduação em Energias Renováveis, Centro de Energias Alternativas e Renováveis. Caixa Postal 5115, Cidade Universitária, João Pessoa - PB, 58059-970. Brasil. +55 83 3216 7268

#### **RESUMO**

Este artigo tem por objetivo avaliar, por meio da Análise do Custo Médio de Produção e de Modelos de Negócio (*Business Model Canvas*), os tipos de biomassa que podem ser utilizados em caldeiras para produção de vapor e água quente propostas para o Hospital Universitário Lauro Wanderley, situado na cidade de João Pessoa – PB. O estudo visa subsidiar um sistema de otimização dos recursos energéticos a serem adotado pelo hospital, uma vez, que o planejamento do sistema que vai produzir um produto ou serviço, é capaz de identificar oportunidades para reduzir custos e impactos negativos ao meio ambiente. Para o estudo, fez-se o levantamento da demanda energética do hospital. Considerou-se apenas a lenha, bagaço de cana de açúcar e pellets na análise, uma vez que são os tipos de biomassas admitidos pela caldeira especificada. Como resultados, observou-se que o recurso mais oneroso foram os pellets enquanto que a lenha, considerando o custo médio de produção e o modelo de negócio, evidenciou melhores resultados.

**Palavras-Chave:** biomassa, sistema de poligeração, custo de produção, hospital.

## 4.1 Introdução

A utilização de múltiplas fontes de suprimento energético em determinadas unidades consumidoras para fins de confiabilidade e melhor aproveitamento energético vem ganhando destaque nos últimos tempos. A poligeração, como é mais comumente conhecida, define-se como a produção combinada de dois ou mais serviços energéticos, cujo objetivo é atingir o máximo aproveitamento das diversas fontes de energia utilizadas. Apresenta como principal vantagem o uso eficiente dessas fontes, já que se exige um estudo mais detalhado da relação geração-consumo, a confiabilidade e a continuidade no fornecimento de energia, além de um melhor aproveitamento, se comparados a sistemas autônomos. Tanto a poligeração quanto a integração energética são ferramentas promissoras para alcançar uma melhor eficiência no uso dos recursos naturais, e na maioria dos casos, também uma redução nos impactos ambientais gerados (SERRA *et al.*, 2009).

Algumas unidades consumidoras, a exemplo dos hospitais, se destacam pelo alto consumo energético e pela necessidade contínua e simultânea de energia elétrica e térmica. Hospitais são, portanto, excelentes unidades com potencial para a implantação de sistemas de poligeração, uma vez que suas condições de conforto, demandas de eletricidade, água quente, aquecimento e refrigeração devem ser continuamente mantidas. Existem estudos recentes na área de otimização de sistemas de poligeração em hospitais (ZIHHER, POREDOS, 2006; ARCURI, FLORIO, FRAGIACOMO, 2007; LOZANO e outros, 2009; ROMERO, CARVALHO, MILLAR, 2014a), mas a configuração ótima desses sistemas ainda é um problema complexo, devido à grande variedade de opções tecnológicas para o fornecimento e conversão de energia, grandes variações diárias e anuais nas demandas energéticas, e ainda variações dos preços e tarifas de energia. Segundo Shang e Kokossis (2005), esta variabilidade presente nas demandas energéticas necessita de uma metodologia de projeto que resulte em sistemas que produzam eficientemente (objetivo termodinâmico), sejam capazes de se adaptar a diferentes condições de demanda e mercado (flexibilidade operacional), além de operar com custo econômico mínimo.

Nesse contexto, este trabalho elabora um plano de negócio e realiza um estudo de custo médio de produção com o intuito de avaliar a utilização de três diferentes tipos de biomassa, como recurso energético em caldeiras para a produção de água quente e vapor, em um sistema de poligeração previsto para um hospital localizado no nordeste brasileiro. A análise é fundamentada na superestrutura estabelecida em Romero, Carvalho e Millar

(2014a, 2014b) e no resultado da otimização prevista em Carvalho *et al.* (2015), onde a biomassa foi um dos recursos energéticos de destaque. Para a região nordeste do Brasil a biomassa aparece como uma opção atrativa, já que a região dispõe de várias maneiras para utilizá-la, a exemplo do bagaço de cana de açúcar, lenha, palha de coco, casca de coco, entre outros. Iniciativas de utilização de resíduos de madeira da construção civil também podem ser origens importantes de biomassa.

#### 4.1.1 Caracterização do Hospital – Superestrutura

O hospital objeto desse estudo é o Hospital Universitário Lauro Wanderley (HU), que está situado no campus I da Universidade Federal da Paraíba, na cidade de João Pessoa, e conta com um conjunto arquitetônico aproximado em 44.000m<sup>2</sup> de área, dos quais, cerca de 9.000m<sup>2</sup> estão em processo de construção (HU, EBSEH, 2013).

Foram consideradas para a implantação do sistema de poligeração, as demandas energéticas típicas de um hospital, a saber: eletricidade, água quente, vapor e refrigeração. As demandas de eletricidade traduzem-se no consumo elétrico de iluminação, elevadores, equipamentos, e depende principalmente do tamanho do hospital. As demandas de água quente (para uso em cozinha e lavanderia) e de vapor (para esterilização) também dependem do porte do hospital (número de leitos). As demandas de conforto térmico (aquecimento, refrigeração) são muito influenciadas pela climatologia do local de instalação do hospital. Devido ao clima de João Pessoa, demandas de água quente para aquecimento ambiental não são necessárias. No total, têm-se variações nas demandas devido ao clima e ao modo de operação do hospital. O clima influenciará as demandas de conforto térmico hora a hora, e o modo de operação do hospital distingue seus dias de operação entre "dia útil" e "fim-de-semana" (ou feriado). Sabe-se que durante finais de semana e feriados os consumos energéticos de um hospital são mais baixos, fato esse refletido nos consumos elétricos medidos.

Para melhor refletir a influência mensal do clima nas demandas energéticas, escolheu-se um período de estudo igual a um ano (doze meses). A operação do hospital somente varia, ao longo do ano, dependendo do tipo de dia, portanto para caracterizar as demandas do hospital estabeleceram-se dois dias representativos (dia útil e fim-de-semana) por mês. Cada dia se divide em 24 períodos horários, resultando em 576 períodos de operação diferentes ao longo do ano.



Dada a disponibilidade de dados reais para eletricidade, estes foram utilizados para demandas elétricas. Para o cálculo das demandas energéticas representativas de água quente, vapor e refrigeração (que independem da localização geográfica do hospital), utilizou-se a aplicação sequencial do método dos graus-dia (ERBS, KLEIN, BECKMAN, 1983), dados climáticos (CLIMATICUS 4.2, 2005), dados de ocupação (NEPOTE, MONTEIRO, HARDY, 2009) e dados obtidos de auditoria energética (ARAÚJO, 2004). A demanda de vapor foi considerada constante durante o período de utilização da central de esterilização, entre 6h e 20h, acrescida da demanda de um balcão térmico no restaurante, no horário de almoço e jantar. A demanda de água quente possui dois contribuintes: a lavanderia, que opera entre 8h e 18h, e o uso interno hospital, que opera sem interrupções durante as 24 horas do dia.

Com base nesse estudo, o hospital apresenta as seguintes demandas energéticas anuais: 2791 MWh de eletricidade, 1947 MWh de água quente, 138 MWh de vapor, e 2309 MWh de refrigeração. A eletricidade foi faturada com modalidade tarifária do tipo horossazonal, apresentando tarifas diferenciadas para os horários de ponta e fora de ponta. Na modalidade escolhida, a tarifa contratada para o dia é R\$129/MWh, enquanto que no horário diferenciado de “ponta”, entre 18h e 21h, o valor contratual é de R\$199/MWh.

A tarifa de gás natural (R\$120/MWh – PBGAS, 2013) não contempla diferenciação horária nem sazonal, e caso algum equipamento que o utilize seja instalado, os custos já incluirão a conexão à malha de distribuição (gasodutos).

Da mesma forma, a tarifa considerada para o diesel (R\$149/MWh) não possui discriminação horária ou sazonal, e os custos da instalação de equipamentos que operem com diesel incluem tanques de armazenagem.

A biomassa utilizada no modelo de otimização proposto em Carvalho *et al.*(2015) foi a proveniente do bagaço de cana de açúcar. O estado da Paraíba conta com oito usinas de cana de açúcar que se estendem por 26 municípios ao longo da linha da costa, todos localizados na proximidade de João Pessoa (NOVA CANA, 2015). Esta fonte de energia foi considerada inicialmente para atender às demandas de água e vapor quente do hospital (por meio de caldeiras). O modelo previu apenas um tipo de recurso, sem considerar os demais possíveis de utilização pelo equipamento e especificidades da região.

Nesse contexto, diante das especificações de um fabricante e do fornecedor de caldeiras a biomassa, foi necessário um estudo que se aproximasse mais das condições

reais de suprimento de biomassa para as caldeiras do sistema de poligeração proposto. Nesse sentido, restringiu-se a análise para o bagaço da cana, a lenha e pellets de madeira, que além de poderem ser utilizados nos equipamentos especificados, são acessíveis ao hospital objeto desse estudo.

## 4.2 Materiais e Métodos

### 4.2.1 Descrição da Superestrutura e dos equipamentos que utilizam biomassa

Para atendimento às demandas energéticas do hospital objeto desse estudo, foi prevista uma superestrutura conforme apresentada na Figura 4.1.

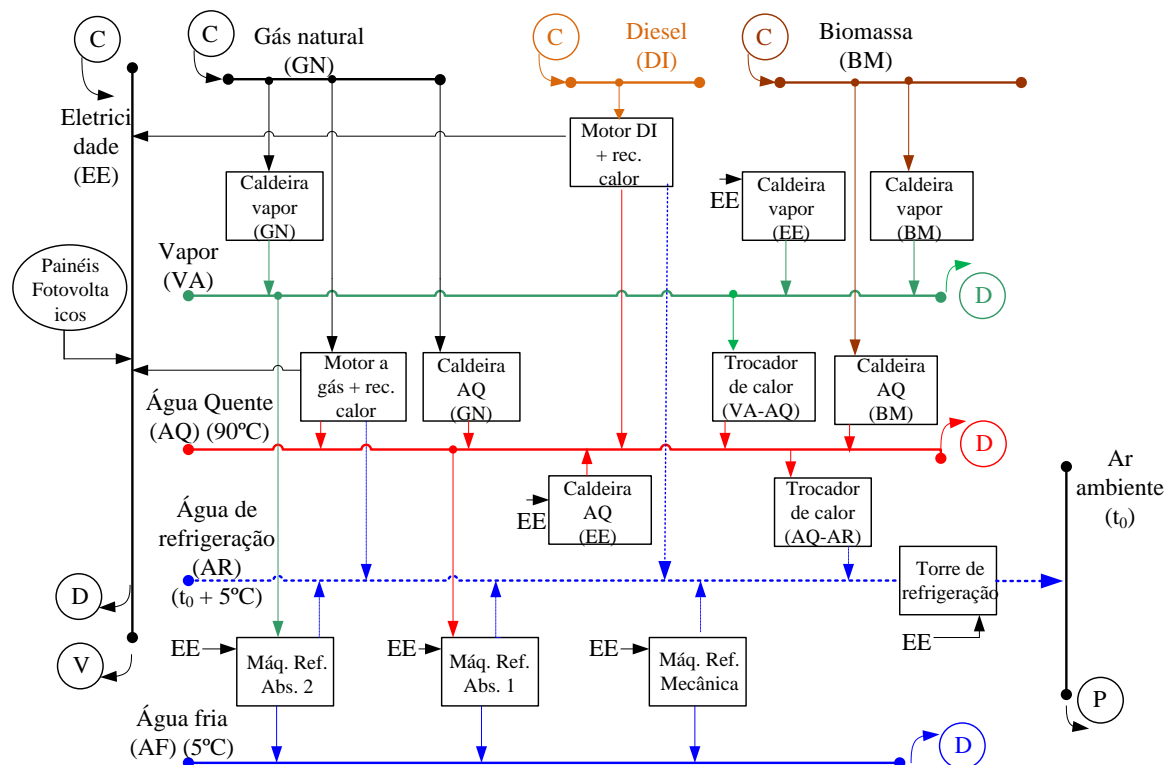


Figura 4.1: Superestrutura de poligeração.

As demandas de água quente e vapor serão supridas por meio de caldeiras. A superestrutura prevê o uso da biomassa, da energia elétrica e do diesel como combustíveis para esses equipamentos. No estudo aqui proposto, serão consideradas apenas as caldeiras que utilizam biomassa para produção de água quente e vapor, uma vez que se propõe analisar qual seria a biomassa mais adequada para atendimento a essas demandas, considerando principalmente o custo médio de produção. O resultado da análise do

presente estudo visa subsidiar o modelo de otimização proposto por Carvalho *et al.* (2015) para a realização de análises de sensibilidade e resiliências dos resultados daquele estudo.

Para o cálculo da quantidade de combustível necessária foram considerados os dados técnicos fornecidos por um fabricante de caldeiras, com a seguinte especificação: caldeira horizontal para a produção de 500 kgv/h para uso de combustível biomassa (lenha, bagaço de cana e pellets de madeira), PMTA - Pressão Máxima de Trabalho Admissível de 7 bar, 02 passagens, temperatura de vapor de 175°C e entalpia de 662 Kcal/Kg, tensão de funcionamento 220V, rendimento de 85%. (MULTINOX, 2015) e as informações do PCI (Poder Calorífico Inferior) e da densidade do material.

#### 4.2.2 Caracterização dos Combustíveis da Caldeira

De acordo com as especificações do fabricante da caldeira, dentre os tipos de biomassa que podem ser utilizadas no equipamento serão analisados o bagaço de cana de açúcar, a lenha e pellets de madeira. Considerando as demandas energéticas anuais de 1947 MWh de água quente e 138MWh de vapor para o hospital, o PCI, o rendimento da caldeira e a densidade do material, calculou-se a quantidade, em m<sup>3</sup>, necessária de cada tipo de combustível, conforme apresentado na Tabela 4.1:

Tabela 4.1: Combustíveis utilizados na Caldeira

CARACTERÍSTICAS	COMBUSTÍVEIS					
	Lenha		Bagaço de Cana de Açúcar		Pellet	
PCI	3100 kcal/kg		2130 kcal/kg		4000 kcal/kg	
Densidade	390 kg/m <sup>3</sup>		130 kg/m <sup>3</sup>		650 kg/m <sup>3</sup>	
Preço	R\$ 110/m <sup>3</sup>		R\$ 16,80/m <sup>3</sup>		R\$ 344,50/m <sup>3</sup>	
Quantidade de MWh/m <sup>3</sup>	1,41		0,32		3,02	
Quantidade de combustível necessária (m <sup>3</sup> )	Água Quente	Vapor	Água Quente	Vapor	Água Quente	Vapor
	1.587,98	112,55	6.997,03	495,94	645,55	45,69

Os PCI e a densidade da lenha e do bagaço da cana foram obtidos no relatório final do BEN – Balanço Energético Nacional (BEN, 2014). Os pellets considerados são de resíduos de madeira, cujos PCI e a densidade foram obtidos no site da Opção Verde Assessoria em Biomassa (Opção Verde, 2015).

Para o cálculo da quantidade de combustível necessária foi utilizado o fator de conversão de 1kcal = 0,00116 kWh e o rendimento da caldeira, que é de 85%.

Os preços de cada combustível foram obtidos por meio de consulta a fornecedores, sendo o da lenha, de R\$ 55/st, informado pela Organização Sertaneja dos Amigos da Natureza (SOS Sertão, 2014), cujo valor já inclui o transporte e a entrega até o pátio do hospital. Esse valor é dado por metro estéreo e a conversão para metro cúbico foi feita utilizando o fator de empilhamento de 0,5 (ENVALMA, 2014).

Os valores do pellet e bagaço de cana, R\$ 344,50/m<sup>3</sup> e R\$ 16,80/m<sup>3</sup>, respectivamente, foram obtidos no site da MFRURAL (MFRURAL, 2015).

O gráfico apresentado na Figura 4.2 compara o valor do MWh dos tipos de biomassa analisados com a tarifa de energia elétrica convencional, fornecida pela rede elétrica, considerando apenas o valor do combustível. No tópico a seguir será apresentado o custo médio de produção dos recursos energéticos analisados e disponíveis para as caldeiras a biomassa.

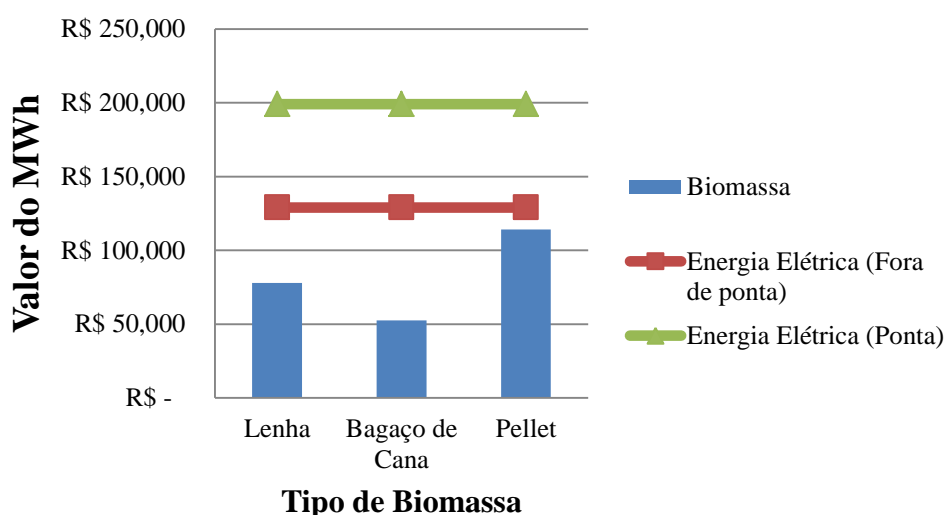


Figura 4.2: Gráfico comparativo do valor do MWh para os tipos de biomassa

#### 4.2.3 Custo Médio de Produção

A formação de preço é com base apenas nos custos, uma vez que o que está sendo avaliado é o tipo de combustível a ser utilizado na caldeira (Tabela 4.2). O custo de investimento, que consiste no fornecimento, transporte, instalação e suporte da caldeira a biomassa, foi obtido através de consulta a fornecedores, cujo valor individual é R\$ 56.520,00 (MULTINOX, 2015). A caldeira pode utilizar os três tipos de biomassa que estão sendo analisados, portanto, o custo inicial é o mesmo para qualquer um dessas.

Para o custo de transporte foi utilizado o cálculo previsto em Rezende e Oliveira (REZENDE E OLIVEIRA, 2001), onde o mesmo é dado pela seguinte expressão:

$$C = 1,5L+(0,025L)D \quad (4.1)$$

Sendo:

C – Custo de Transporte por m<sup>3</sup> estéreo (m<sup>3</sup> st)

L – Preço do litro do Diesel

D – Distância em km

Para o cálculo do valor do transporte, foram consideradas as seguintes informações:

Para o bagaço da cana: são oito usinas instaladas no Estado da Paraíba, nos municípios de Caaporã, Pedras de Fogo, Santa Rita, Mamanguape e Rio Tinto. A distância considerada no cálculo para o transporte foi de 45 km, uma vez que apenas uma usina é próxima da unidade consumidora (13 km), sendo as demais, distantes aproximadamente 45km do hospital. O preço do diesel atribuído para o cálculo foi de R\$ 3,10 reais, média dos preços praticados pelos postos de combustíveis no estado. Considerou-se ainda um metro cúbico de bagaço de cana igual a um metro estéreo;

- 1) No caso do pellet, o fornecedor mais próximo está localizado na cidade de Recife-PE (Pellet Nordeste, 2015) e percorre uma distância de 120 km para entregar o material no hospital. O preço médio do diesel considerado foi de R\$ 3,10 reais.

Vale salientar que, no caso da lenha, o valor apresentado na Tabela 4.1 já inclui o custo do transporte e que a vida útil das caldeiras é de 15 anos, logo será considerada a avaliação do suprimento energético da demanda anual durante esse período.

Tabela 4.2: Custo Total Anual por tipo de Biomassa

Formação do Custo	Lenha		Bagaço de Cana		Pellets	
	Água quente	Vapor	Água quente	Vapor	Água quente	Vapor
Custo da Caldeira (R\$)	56.520,00	56.520,00	56.520,00	56.520,00	56.520,00	56.520,00
Transporte da Caldeira (R\$)	13.800,00	13.800,00	13.800,00	13.800,00	13.800,00	13.800,00
Quantidade de Combustível(m³)	1.587,98	112,55	6.997,03	495,94	645,55	45,69
Preço do Combustível (R\$/m³)	110,00	110,00	16,80	16,80	344,50	344,50
Custo total do Combustível (R\$/m³)	174.677,80	12.375,00	117.550,10	8.331,79	222.391,97	15.740,20
Custo do Transporte (R\$/m³)	(incluso no preço do combustível)		8,52	8,52	13,95	13,95
Custo do transporte (R\$)(incluindo taxa de abastecimento de 5% e ICMS)	(incluso no preço do combustível)		62.595,43	4.436,68	11.063,16	783,01
<b>CUSTO TOTAL ANUAL (R\$)</b>	<b>244.997,80</b>	<b>82.695,00</b>	<b>250.465,53</b>	<b>83.088,47</b>	<b>303.775,13</b>	<b>86.843,21</b>

A alíquota de 17% do ICMS só foi considerada no caso dos pellets, já que o fornecedor fica no município de Recife/PE, logo o transporte da carga é interestadual, partindo do estado de Pernambuco para o estado da Paraíba. A taxa de abastecimento de 5% é referente à carga e descarga do material.

#### 4.2.4 Plano de Negócio - *The Business Model Canvas*

Segundo Dornelas (2012) o plano de negócio é parte fundamental do processo empreendedor. A decisão pela construção de um plano de negócio para a implantação do empreendimento aqui proposto, que é a utilização da biomassa nas caldeiras da superestrutura do hospital, deve-se ao fato de que a utilização desse tipo de ferramenta permite avaliar, com mais clareza, as possibilidades de êxito, na tentativa de diminuir os riscos do empreendimento. A Figura 4.3 apresenta a tríade: Objetivo, Processo de Negócio, Resultado, para o modelo de negócio que está sendo proposto nesse trabalho.

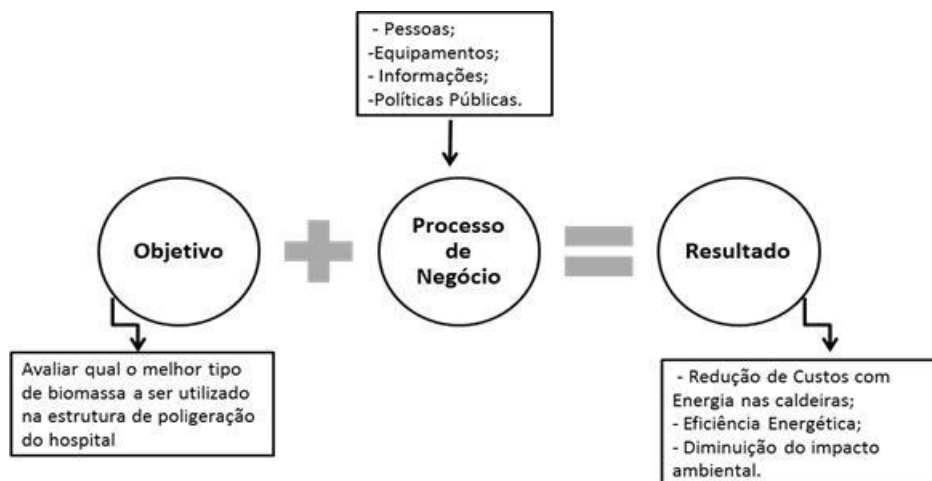


Figura 4.3: Tríade para o empreendimento.

Existem algumas ferramentas que auxiliam na construção de um plano de negócio e aqui se optou pelo modelo CANVAS. O *Business Model Canvas* é um modelo simples, descrito em uma folha de papel e disposto em nove blocos, que permite ter uma visão geral do que se quer empreender. Os blocos cobrem as quatro áreas principais de um negócio, a saber: clientes, oferta, infraestrutura e viabilidade financeira. Serão elaborados três modelos, sendo um para cada tipo de biomassa analisada: lenha, bagaço de cana e resíduos de madeira. Os nove blocos do modelo CANVAS a serem preenchidos, serão descritos conforme a seguir:

#### 4.2.4.1 Principais Alianças

Nesse bloco, deverão ser levantados os parceiros necessários para que o negócio obtenha êxito. O rol dos principais fornecedores, as parcerias necessárias para a aquisição de recursos, e a consequente redução de riscos devem ser apresentados.

#### 4.2.4.2 Estrutura de Custos

Esse tópico é destinado ao levantamento do custo necessário para que a eficiência e bom funcionamento do empreendimento.

#### 4.2.4.3 Principais Atividades

São as atividades chave do empreendimento. Devem-se descrever as atividades mais importantes, as que mais impactam para o êxito do projeto e, ainda, que ofereçam uma proposta de valor.

#### 4.2.4.4 Principais Recursos

Os principais recursos de um empreendimento devem ser listados no modelo para que o mesmo possa oferecer o que está sendo proposto. Esses recursos apontados são materiais, financeiros, humanos e intelectuais.

#### 4.2.4.5 Proposta de Valor

A proposta de valor aqui apresentada seria a justificativa, o motivo pelo qual deverá ser utilizado um combustível em vez de outro. Descreve produtos e serviços que agregam valor para cada segmento de cliente.

#### 4.2.4.6 Relacionamento com o cliente

O hospital é o grande consumidor considerado no empreendimento. Por se tratar de uma unidade consumidora de grande porte e, ainda, por necessitar de um serviço confiável e contínuo, esse bloco deve ser criteriosamente analisado.

#### 4.2.4.7 Canais

Representa os mecanismos de comunicação existentes no negócio. A forma de divulgação e o *feedback* do cliente no empreendimento são requisitos importantes para compor esse bloco.

#### 4.2.4.8 Modelo de Receitas

Este componente trata das receitas geradas pelo empreendimento. No modelo aqui proposto, a receita será analisada com base na comparação com outros recursos energéticos que podem ser utilizados na caldeira.

#### 4.2.4.9 Segmento de Clientes

O cliente é a parte mais importante de qualquer negócio. Nesse bloco devem-se informar as necessidades, comportamento e atributos de cada segmento de cliente.

### 4.2.5 Modelo de negócio para os tipos de biomassa disponíveis para o hospital

Para o empreendimento proposto nesse trabalho, foram construídos três modelos de negócio, representados nas tabelas (Tabela 4.3, Tabela 4.4 e Tabela 4.5), a seguir, sendo um para cada tipo de recurso energético a ser utilizado nas caldeiras.







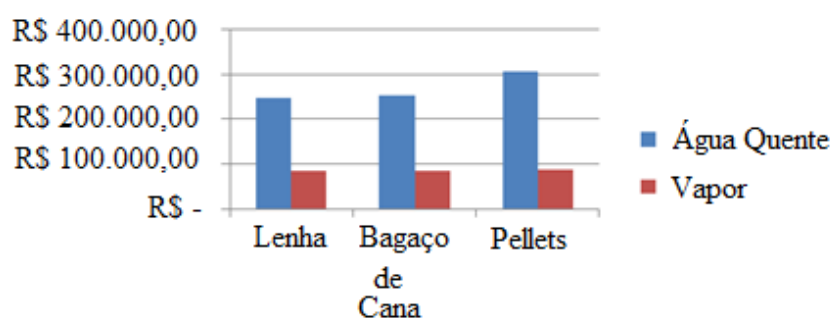


Figura 4.4: Custo Anual Total.

O Custo Anual Total foi o principal critério para escolha da biomassa, já que no que se refere ao modelo de negócio, as situações são bem semelhantes. Os pellets apresentam a vantagem do armazenamento e condicionamento do material, já que são mais compactos, mas foi o recurso que apresentou maior custo anual.

No comparativo entre o custo médio de produção da lenha e da biomassa de bagaço de cana de açúcar, observa-se uma ligeira vantagem da lenha (2,18%) em relação ao custo anual do bagaço da cana de açúcar. Deve-se considerar ainda que, além do custo menor, na Paraíba, a aquisição da lenha é mais fácil, se comparada ao bagaço da cana de açúcar, pois o fornecimento desta, de acordo com a safra no estado, pode não ser contínuo.

A Tabela 4.6 apresenta o custo, em reais, do MWh para cada tipo de Biomassa analisado. Percebe-se que o custo do MWh da lenha é 15,17% inferior ao da energia elétrica no horário fora de ponta e 45% inferior ao do horário de ponta de consumo de energia elétrica. Para o bagaço de cana de açúcar, esses valores são, respectivamente, de 13,9% e 44,19%.

Quanto aos pellets, o custo do MWh é superior ao da energia elétrica no horário fora de ponta, em 17,21%, mas se comparado à energia elétrica no horário de ponta o valor do MWh é inferior em 21,69%.

Tabela 4.6: Comparação entre o custo do MWh das Biomassas e do MWh da Energia Elétrica

Tipo de Biomassa	Valor do MWh (R\$/MWh)
Lenha	R\$ 109,42
Bagaço de Cana de Açúcar	R\$ 111,06
Pellets	R\$ 155,83
Energia Elétrica – Fora de Ponta	R\$ 129,00
Energia Elétrica – Ponta	R\$ 199,00

#### 4.4 Conclusões

A adoção de equipamentos e combustíveis mais eficientes, econômicos, e que geram menos emissões ao meio ambiente, deve ser analisada com atenção pelas empresas, especialmente pelos órgãos públicos, pois refletirá diretamente sobre a imagem que seu público alvo fará da marca; além de estar agregando valor aos recursos adotados.

Verificou-se na Figura 4.2 que o valor do MWh do bagaço da cana, considerando apenas o custo do combustível, é inferior ao da lenha e ao dos *pellets*. No entanto, os custos indiretos, principalmente relacionados com o transporte, o fornecimento e o armazenamento desse recurso, não o apresenta como um recurso atrativo.

A análise e o estudo detalhado dos resultados apresentados na Tabela 4.2 e nos modelos de negócio para o empreendimento, qual seja, a escolha da biomassa para uso nas caldeiras do hospital, apontam a lenha como o recurso mais viável e de menor custo. Essa informação, subsidia com mais consistência, a inserção desse recurso na superestrutura do hospital e conseqüentemente a otimização do sistema de poligeração previsto, possibilitando verificar com mais clareza a redução de custos e diminuição do impacto ambiental.

O texto deste artigo difere ligeiramente da versão submetida ao IV Simpósio Internacional de Gestão de Projetos, Inovação e Sustentabilidade (IV SINGEP), devido às observações e sugestões apresentadas pela banca examinadora.

#### 4.5 Referências Bibliográficas

ARAÚJO, M. M. D. “Contribuição Metodológica para o Diagnóstico Exergético de Sistemas Térmicos e Elétricos - Estudo de Caso do Hospital Universitário Lauro Wanderley”, 2004 Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2004.

BRASIL, EPE, Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional-2014. Disponível em <[https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio\\_Final\\_BEN\\_2014.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2014.pdf)> Acesso em 11/08/2015.

EBSERH, Empresa Brasileira de Serviços Hospitalares. Hospital Universitário Lauro Wanderley/UFPB: Dimensionamento de serviços assistenciais e da gerência de ensino e pesquisa. Disponível em: <[http://www.ebserh.mec.gov.br/images/pdf/contratos\\_adexao\\_huf/ufpb/dimensionamento\\_de\\_servicos\\_hulw\\_ufpb.pdf](http://www.ebserh.mec.gov.br/images/pdf/contratos_adexao_huf/ufpb/dimensionamento_de_servicos_hulw_ufpb.pdf)>. Acesso em: 08 de novembro de 2014.

CLIMATICUS 4.2. Banco de dados Climáticos. Estratégias de projeto 58 cidades brasileiras. Base de dados do INMET 1961-1990. Versão beta. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo - Departamento de Tecnologia - Laboratório de conforto ambiental e eficiência energética, 2005. Disponível em: [http://www.usp.br/fau/pesquisa/laboratorios/labaut/conforto/Climaticus\\_4\\_2.xls](http://www.usp.br/fau/pesquisa/laboratorios/labaut/conforto/Climaticus_4_2.xls). Acesso em 29/11/2013.

CARVALHO, M., CHARCATEGUI, R, JUNIOR, L.M.C, DELGADO, D. B. M. Optimization of Energy Supply and Conversion in a Northeast Brazil Hospital: Use of photovoltaic panels. Aceito no 23 rd ABCM International Congress of Mechanical Engineering, 2015.

DORNELAS, José Carlos Assis. Empreendedorismo: Transformando Ideias em Negócios. 3 ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012

ENVALMA, Nota Técnica. Disponível em [http://www.entalma.com/wa\\_files/Nota\\_20T\\_C3\\_A9cnica\\_203-Metros\\_20Cubicos\\_20x\\_20Metro\\_20Estereo.pdf](http://www.entalma.com/wa_files/Nota_20T_C3_A9cnica_203-Metros_20Cubicos_20x_20Metro_20Estereo.pdf). Acesso em 04/08/2015.

ERBS, D.G., KLEIN, S.A., BECKMAN, W.A. Estimation of degree-days and ambient temperature bin data from monthly-average temperatures, *ASHARE Journal*, vol. 25, n. 6, pp. 60-65, 1983.

MFRURAL.O agronegócio passa por aqui. Disponível em <<http://www.mfrural.com.br/busca.aspx?palavras=bagaco+cana>>. Acesso em 21/07/2015.

MULTINOX, MULTINOX do Brasil. Disponível em <<http://www.multinoxdobrasil.com/caldeiras.html>> Acesso em: 23/07/2015.

NEPOTE, M. H. A., MONTEIRO, I. U. HARDY, E., 2009. *Associação entre os índices operacionais e a taxa de ocupação de um centro cirúrgico geral*, Rev. Latino-Am. Enfermagem [online], vol. 17, n.4.

PBGÁS, Companhia Paraibana de Gás. Tarifas. Disponível em [http://www.pbgas.com.br/?page\\_id=1477](http://www.pbgas.com.br/?page_id=1477). Acesso em 24/12/2013.

PELLET NORDESTE. Disponível em [http://www.pelletsnordeste.com/?page\\_id=53&lang=pt-br](http://www.pelletsnordeste.com/?page_id=53&lang=pt-br). Acesso em 20/07/2015.

NOVA CANA, Usinas de Açúcar e Alcool no Estado da Paraíba. Disponível em <http://www.novacana.com/usinas-brasil/nordeste/paraiba/> Acesso em 10/08/2015.

OPÇÃO VERDE. Assessoria em Biomassa. Disponível em <http://www.opcaoverde.com.br/biomassa>. Acesso em 10/08/2015.

REZENDE, J. L. P. de., OLIVEIRA, A. D. de, Análise econômica e social de projetos florestais . Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2001. 389 p.

ROMERO, A., CARVALHO, M., MILLAR, D. L. Application of a polygeneration optimization technique for a hospital in Northern Ontario. *Transactions of the Canadian Society of Mechanical Engineering*, vol. 1, 2014a.

ROMERO, A., CARVALHO, M., MILLAR, D. L. Biomassa e energia solar térmica na síntese e otimização de um sistema de poligeração. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 5., 2014, Recife. *Anais*. Recife: ABES, 2014b.

SERRA, L.M. *et al.* Polygeneration and efficient use of natural resources. *Energy*, vol. 34, p. 575-586, 2009.

SHANG, Z., KOKOSSIS, A. A systematic approach to the synthesis and design of flexible utility systems. *Chemical Engineering Science*, vol. 60, p. 4431-4451, 2005.

SOS SERTÃO, Plano de Negócio da Associação Malhada, p.39, 2014

ZIHER, D., POREDOS, A. *Economics of a trigeneration system in a hospital*. *Applied Thermal Engineering*, 2006, n. 7, 680-687 p. 26 v.

## Capítulo 5

### Artigo 3 – Environmental Loads Associated with a Polygeneration Superstructure for a Tertiary Sector Building

#### **Danielle Bandeira de Mello Delgado**

Universidade Federal da Paraíba, Programa de Pós Graduação em Energias Renováveis, Centro de Energias Alternativas e Renováveis. Caixa Postal 5115, Cidade Universitária, João Pessoa - PB, 58059-970. Brasil. +55 83 3216 7268

#### **Cintia Maria de Medeiros**

Universidade Federal da Paraíba, Caixa Postal 5115, Cidade Universitária, João Pessoa - PB, 58059-970. Brasil. +55 83 32167268

#### **Monica Carvalho**

Universidade Federal da Paraíba, Programa de Pós Graduação em Energias Renováveis, Centro de Energias Alternativas e Renováveis. Caixa Postal 5115, Cidade Universitária, João Pessoa - PB, 58059-970. Brasil. +55 83 3216 7268

#### **ABSTRACT**

The environmental impacts associated with an energy supply system are evaluated here through the Life Cycle Analysis (LCA) methodology. A superstructure is proposed to meet the energy demands (electricity, hot water, steam and cooling) of the Lauro Wanderley University Hospital, located in João Pessoa - PB. The introduction of LCA nowadays has allowed for the planning of the system that produces a service or product, and is capable of identifying opportunities to reduce environmental loads, both in the use of resources and waste scenario considered. The SimaPro® software was utilized, considering the availability of renewable energy sources (solar photovoltaic, biomass). The material composition of the equipment was considered, as well as lubricating oils and other composts used during operation, and final waste scenario (recycling, reuse or landfill). It was observed that the most polluting equipment was the diesel generator, which presented the highest CO<sub>2</sub> emissions. Other equipment, such as the mechanical chiller, heat exchangers and photovoltaic system, provided fewer emissions. Regarding the fuel options, electricity generated the highest emissions, while biomass promoted better results.

**Keywords:** Life Cycle Analysis, Polygeneration, Superstructure

## 5.1 Introduction

The Lauro Wanderley University Hospital (HU) is located on campus I of the Federal University of Paraíba, in João Pessoa, and has an approximate architectural set in 44.000m<sup>2</sup> area, of which about 9,000m<sup>2</sup> are under construction (HU, EBSEH, 2013).

According to Brazilian Company of Hospital Services (EBSEH, 2013), the HU is the most important health center in the Atlantic Forest, which covers 14 cities of Paraíba, and currently has 238 beds in Unified Health System (SUS), distributed in various therapeutic wards, such as the clinical and surgical wards (CNES, 2014); Also note that only the city of João Pessoa, represents 61.24% of the population served by the first health region (EBSEH, 2013).

If we consider the latest census conducted by the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE, 2010), the population of the city of Joao Pessoa represented 723,515 inhabitants, as the census has conducted every 10 years and is making use of estimates, the population estimated for the year 2014 was 780,738 inhabitants, which represents an increase of approximately 7.91%. Parallel to population growth has also increased demand for care. In 2012, for example, the number of monthly medical visits was 9,178 and the annual reached 110,130; comparing the prediction made in 2014, the number of monthly visits rose to 21,053 and the annual reached 252,636, which means an increase of almost 130% in the number of calls in a just two years' time (EBSEH, 2013). The total percentage of consultations increased far beyond population growth, which also represents a significant increase in hospital energy consumption, and consequently in its operating expenses, which caters exclusively to the SUS.

The current Brazilian energy crisis could, eventually, compromises the care of some health care services, especially hospitals even though 46% of the country's energy matrix is generated from renewable sources (hydroelectric) this feature today inspires the attention and efforts of various governments so as not to extinguish (BEN, 2014). There is also the environmental issue directly related to the energy crisis, as energy inefficiency and waste are entirely related to the operation of the hospital, demanding power backup systems available at any time, especially in places where it processes the hospital medical-assistance.

Taking into account the abundance of sunlight in Brazil, solar energy emerges as sustainable option among the renewable energy sources available, for application in



heating water and hospital environments as well as in own generation lighting (BITENCOURT, 2006). The panels or photovoltaic modules are produced from photosensitive semiconductor devices, which capture sunlight and convert radiation into electrical energy. Although not all have access to this kind of technology, because of the cost of installation, some experimental programs conducted by CESP have enabled this integration in the public health care system, such as the adoption of photovoltaic panels held in 10 health centers located in the Valley region of the Ribeira. Thus, it was possible to perform cooling of vaccines and serum, lighting, as well as the supply of the load required for the operation of the VHF radio; as a result, it was noticed that the panels have proved very efficient in power generation (as in minimum maintenance expenses), which could facilitate its adoption in other public health facilities (FERREIRA, 1993).

According to ABNT (2015), the ISO 14040, which addresses environmental management, Life Cycle Analysis (LCA) studies the environmental aspects and potential impacts throughout a product's life (from "cradle to grave"), from acquisition of raw materials, through production, use and disposal (either disposal or recycling). Hinz *et al.* (2006) measures the LCA as a simple methodology that will facilitate the analysis of the environmental impacts generated by the activities of a company. With the creation of this methodology, you can check not only the prevention of pollution itself, but a reliable scheme that can help in the decision making process in order to generate the least possible environmental impact, and even compare other methods in the same analysis (HINZ *et al.*, 2006).

A good example of its application would be the adoption of life cycle analysis in buildings. LCA is an effective management tool, being able to detect the impacts to the environment at every stage of its life (from extraction of raw materials and transportation, energy consumption required to manufacture the produced materials and waste, earthmovings, water consumption and energy needed for construction and use of the building, demolition and maintenance) in order to evaluate and propose alternatives that minimize environmental burdens potentially produced. (ENERBUILCA PROJECT, 2012).

That is, the life cycle analysis can be seen from project design to delivery and even after maintenance delivery of construction. The Verdegreen Hotel, located in João Pessoa – PB, opened in December 2008 and its environmental management system (EMS) was planned in 2009 and installed in 2010; when it started to adopt environmental policy

together with the life cycle of materials, which included aspects of sustainability from the building systems employees as well as the development of environmental awareness among staff and even guests, which allowed this short period of operating results fairly satisfactory, ranging from the reduction of environmental impacts and costs in own building maintenance (RAMOS, 2013).

In 2012 it was adapted to ISO 14001 and was elected by the "Brazil Guide Prize" as sustainable hotel of the year, offering inclusive the green leaf seal (which is conferred only sustainable hotels) and Trip Advisor's excellence certification making it a sustainable venture respected not only in Brazil but in the world. Among the environmental strategies adopted, it has: natural lighting throughout the social area; use only reforestation wood in construction; rainwater reuse, of sinks and showers to supply the gardens, orchards and even toilets; smart elevators; organic garden, for purposes of consumption and environmental education, as the host itself can help in the management of the garden; low consumption LED lighting; water heating by solar energy; Most vendors found less than 100 km; dual drive discharges; use of recycled and certified paper; garbage selective collect; conservation and maintenance of public garden; among others (SALGADO *et al.*, 2014)

This study will quantify the environmental impacts associated with the components of the supply of energy superstructure of a hospital. Energy resources and equipment will be assessed through technical life cycle analysis, which is the basis of the study that the future will serve as a technical reference in decision making photovoltaic deployment in Lauro Wanderley University Hospital, located in João Pessoa-PB.

## 5.2 Materials and Methods

According to the Society of Environmental Toxicology and Chemistry, *apud* Fullana & Puig (1997), one can define the Life Cycle Analysis as a process capable of evaluating environmental burdens associated with a product, process or activity in order to identify and quantify all materials and energy necessary for it to be produced. LCA also allows find out what the possible impacts to the environment, providing an overview of the entire chain (starting from the extraction of raw materials and ends at the final disposal of waste). This analysis will be critical in the decision making process, as well as creating measures to minimize the impacts may also influence the final cost of the product, process or activity.

Starting from that point as a reference, it is clear that LCA is an important mechanism to be used in decision-making because it allows to evaluate from environmental issues (such as the polluting gases allocated to production or transportation of a product, the degrading effects that the installation of a specific activity may generate a location) to the viability of the cost. In other words, it is a very complex report that allows the evaluation of several decision parameters, which mostly include the environment, to optimize processes and materials for minimal waste possible, and therefore, the minimum possible impact.

In the face of this, the present study made use of LCA as technical and environmental assessment process to measure the environmental impact associated with the constituent elements of an energy superstructure proposal for the Lauro Wanderley University Hospital, located in João Pessoa (Paraíba).

As it is an assistance unit, where continuity and reliability of energy supply are extremely important requirements, the study proposes a superstructure (Figure 5.1) equipment to meet the energy demands of electricity, hot water, steam and cooling. All hardware which make the superstructure are commercially available technologies as well as energy resources necessary for their supply. In this context, it is thought the ability to improve energy generation from the hospital, with the use of conventional non-renewable sources, solar panels were inserted to generate electricity and biomass to produce heat.

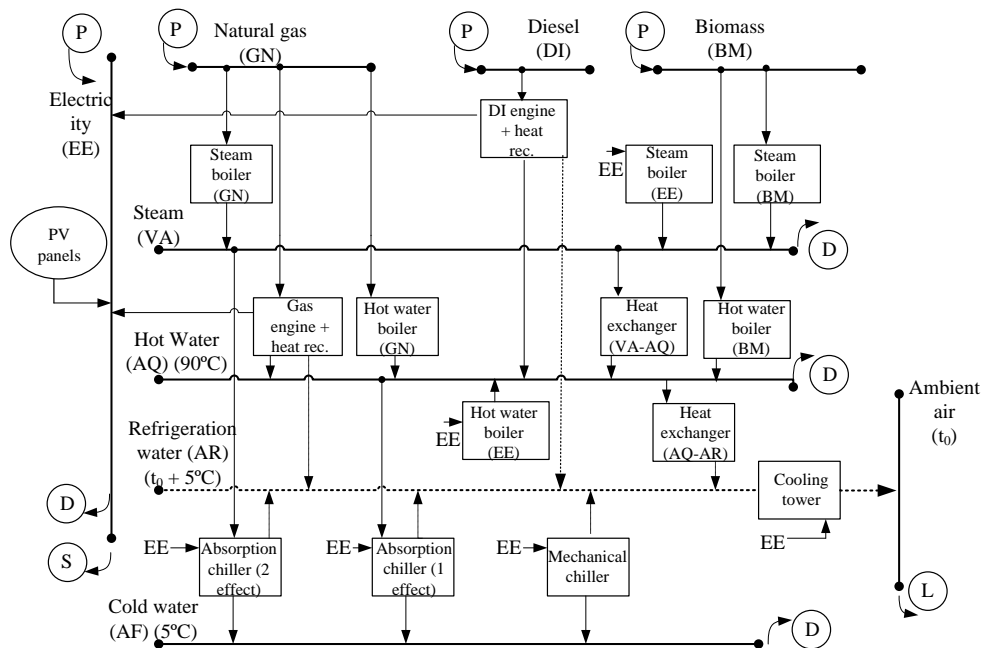


Figure 5.1: Polygeneration superstructure for the hospital.

The use of biomass has grown considerably in Brazil, particularly biomass waste, waste from crops such as sugarcane, cassava, soy, sorghum, corn and eucalyptus. The most widespread is still derived from sugarcane, largely encouraged by the government with the creation of the Incentive Program for Alternative Sources of Electric Energy (PROINFA) in 2002, from the necessity to contain the energy crises in country, stemmed from a lack of oil, coal and water (BRAZIL, 2002).

From then on, this energy resource already represents 7.6% of electricity generation in the country, second only to natural gas (11.3%) and water resources, representing 70.6% of electricity generation (EPE , 2014).

According to the IEA (2012), solar energy along with geothermal and wind power represent 0.4% of primary energy in Brazil. Although it seems little, compared to other energy sources, if we take into account the existing availability in the country, about 2,200 hours of sunshine (national average per year), representing a potential equivalent to 15 trillion MWh, which corresponds to about 50,000 times the Brazilian energy consumption (RODRIGUES, MATAJS, 2004).

Photovoltaic solar energy is characterized by the production of electric current through direct capture sunlight. This current is collected and processed by device drivers and converters which can be stored in batteries or used directly in systems connected to the grid (VILLALVA & GAZOLI, 2013). The insertion of this type in the superstructure system is mainly motivated by the use of the sun as an energy resource, to strengthen the conventional supply being suggested here the interconnected system, since, in the case of a hospital and continuity of supply must be maintained.

The Life Cycle Analysis was performed using the software SimaPro (Pré Consultants, 2015) which is a world leading program in LCA segment keeping in view its wide range of existing databases and their compliance with the recommendations of the ISO 14040 standards and 14044, dealing with the adoption of LCA in the environmental impact assessment (ABNT, 2015). In SimaPro you can analyze all processes and input and output streams on the form of inventory, engaged in any activity (COSTA, 2012).

Among the various databases available in version 8.0.3 of the Simapro the Ecoinvent (Version 3) (Ecoinvent, 2013) was chosen, bearing in order to have photovoltaic solar panels, one of the objects of analysis in this study. The Ecoinvent is considered today as the leading global provider of life cycle inventory, and this is due to the quality of the

data it obtained (from studies based on industrial science) capable of generating broad and rigorous evaluations, with life cycle indicators of the materials (Ecoinvent, 2013).

The method IPCC, 2013 version, for environmental impact assessment was adopted the which express environmental impacts in kg CO<sub>2</sub> eq, then air emissions are quantified and multiplied by a conversion factor (IPCC, 2014). Developed by the Intergovernmental Panel on Climate Change, which lists possible climate change factors between periods of 20, 100 and 500 years, the method has a targeted approach to the problem (midpoint). With the chosen database (Ecoinvent 3), the program allows confront the characterization factors of an activity or product (in this study, the implementation of photovoltaic cells) to generated emissions.

In this context it was held the LCA of energy superstructure to the Lauro Wanderley Hospital, considering all their necessary equipment and energy resources.

To do the analysis was necessary to insert all the data relating to equipment (such as material composition and consumption), in Simapro, which caused inventories processes, as well as the very assembly of equipment and disposal (which culminated in detailing all emissions from assembly through to recycling or disposal of materials).

From there, a flowchart representing each stage of LCA from manufacturing to re-use was prepared analyze which of the equipment would be more effective among the above.

### 5.2.1 Scope of Analysis

Armed with all the necessary information about the equipment, it began compiling the inventory (key piece in LCA). Through data collection (raw material, energy, manufacturing and transportation), it became clear all inputs and outputs of resources in order to assist in the comparison process between the proposed equipment and resources.

More broadly, it can be said that the Simapro allows you to draw a schematic map of each component. This is due to the inclusion of all data concerning each (specifying materials), as well as in measuring the information required for its use (water, fuel and transportation when necessary), maintenance and final disposal.

It was felt that in some equipments for wastewater and the oil used were treated and reused and when this reused and when this was not possible, they were discarded. Each equipment of the superstructure was superstructure was detailed with the specification and chemical composition informed by the manufacturers. the manufacturers. Table 5.1 following the considerations of the main materials of each equipment that makes up the superstructure considering a useful life of 15 years. Then,

Table 5.2 shows the characteristics of energy sources used in the energy supply of the system.

Table 5.1: Main components of the superstructure equipment

Item	Equipment	Function in superstructure	Weight (kg)	Material Composition (kg)
01	Gas Engine	Power generation, hot water and chilled water.	1,620	Low Alloy Steel = 225, cast iron = 1,300, decarbonized water user = 660, lubricating oil = 540, chrome steel plate = 75, polyvinyl chloride (PVC) = 5 (wiring) (CATERPILLAR, 2014).
02	Diesel Generator	Power generation and hot water, chilled water	5,118	Plate chrome steel = 375, cast iron = 3,500, lubricating oil = 1,292, low alloy steel = 300, Synthetic rubber = 50, decarbonized water user = 870, polyvinyl chloride (PVC) = 20, Battery = 240, copper = 105 (for wiring).  Obs.: Battery composed of: sulfuric acid = 0.250, Lead = 0.250, = 0.500 Polypropylene (CATERPILLAR, 2014).
03	Biomass boiler	Hot water and steam production	2,000	Chromed steel tube = 200, chrome steel = 1,780, chromed steel plate = 37.50, Copper = 50, Polyvinyl chloride = 10 (for wiring) (MULTINOX, 2015).
04	Boiler electricity and natural gas	Hot water and steam production	1,630	Rock wool = 115, aluminum anodized sheet = 77.328, low alloy = 490 steel, chrome steel = 980, chrome steel plate = 37.50, Copper = 50, Polyvinyl chloride (PVC) = 10 (for electrical installation) (MULTINOX, 2015).
05	Photovoltaic System	Electricity production	4,000	Photovoltaic panel = 1,200 (KYOCERA, 2014), inverter 500 kW = 2,445, chrome steel plate = 37.50, Copper = 300, Polyvinyl chloride (PVC) = 25 (for wiring) (SANTERNO, 2014).
06	Chiller mechanical	Mechanical cold production (refrigeration)	2,536	Scroll compressors type = 120, decarbonized water by User = 4.92, rigid polyurethane foam = 30, anodized aluminum sheet = 106.43, chrome steel = 2000 Copper = 30, Polyvinyl chloride (PVC) = 10, Chapa chrome steel = 37.50 (for wiring) (CARRIER, 2014).
07	Heat exchanger - (Steam-Water Hot)	Steam conversion in hot water	96.90	Titanium dioxide = 2, iron alloy chrome = 93.35, Epoxy Resin = 0.5 (EVACON, 2014).
08	Heat exchanger - (Cooling Hot Water Water)	Hot Conversion cooling water	78.70	Titanium dioxide = 3, iron alloy chrome = 75, Epoxy Resin = 0.5 (EVACON, 2014).
09	Cooling Tower	Evacuated heat not usable for the environment (cooling water)	3,000	Fiberglass = 2,622, cast iron = 200, copper = 10, chrome steel plate = 37.50, polyvinyl chloride (PVC) = 10 (for wiring) (ALPINA, 2014).
10	Cooling machine for Simple Absorption Effect	Cold water production (cooling)	9,500	Lithium bromide = 2,200 chrome steel = 7,418, chrome steel plate = 37.50, Copper = 30, Polyvinyl chloride (PVC) = 10 (for wiring) (CARRIER, 2014).
11	Cooling machine for Double Effect Absorption	Cold water production (cooling)	8,800	Lithium bromide = 1.600, chrome steel = 7,338, chrome steel plate = 37.50, Copper = 30, Polyvinyl chloride (PVC) = 10 (for wiring) (CARRIER, 2014).

Table 5.2: Energy Resources considered in the superstructure

Item	Resource	Considerations for 1 kWh
01	Natural Gas	Formed mainly by methane, ethane, propane and butane.
02	Diesel Oil	Formed mainly of carbon, hydrogen and low concentrations of sulfur, nitrogen and oxygen.
03	Biomass	Processing of sugarcane bagasse combustion to produce heat and electricity.
04	Conventional Electricity	Electricity produced by high voltage power plant: 0.4804 kWh Electricity produced by high voltage power plant: 0.4458 kWh Electricity produced by high-voltage wind farm: 0.0738 kWh Broadcast networks: 700 km Distribution Networks: 20 km

#### 5.2.1.1 Gas Engine

For the gas engine was considered the remanufacturing by the manufacturer, since it provides the possibility. To make this possible, it was stipulated in the calculations of LCA shipping to import, given that the location of the manufacturer is in another country (USA), estimated distance in 8,400 km; and, over the useful life of the equipment (15 years), it was considered that the equipment would be sent back to the manufacturer for remanufactured, and the other directed to the municipal waste landfill Joao Pessoa (distance of approximately 21.4 kilometers from hospital). In this case, they considered the terrestrial transport and by ship for delivery, useful afterlife, back to the manufacturer.

#### 5.2.1.2 Diesel Generator

In the case of diesel generator, it was estimated that it would be recycled by a company specializing in recycling industrial equipment located 2,700 km hospital, then, truck transportation to send to the company was considered in the analysis. As to the treatment given in addition to the waste water and oil, it was considered that the treatment also extend to waste rubber, PVC and scrap copper used in the conductors for wiring the same, as well as lead scrap batteries collected for local appropriate for your collection and disposal. And the remnant waste directed to the municipal landfill in João Pessoa, with approximate distance of 21.4 km.

#### 5.2.1.3 Boilers for producing hot water and steam

In the superstructure, there are six boilers to produce steam and hot water, two biomass, two natural gas and two electricity. Material composition of equipment is almost



the same and the significant change in the analysis is through fuel used in each of which will be analyzed in a future work optimization.

For boilers, it was considered recycling (PVC, copper, steel and aluminum) by a company specializing in industrial equipment, located 2,700 km in hospital. For disposal, it was considered that the waste would be directed to the municipal landfill João Pessoa, at a distance of 21.4 kilometers.

#### 5.2.1.4 Photovoltaic system for the production of Electric Power

For the PV plant, it was estimated the availability of 200 photovoltaic solar panels, which occupied the corresponding area is 328m<sup>2</sup> and 100 inverters of 500kW. As the proposed system is interconnected to the electric grid, were not provided batteries for energy storage purposes.

It was considered transport both for the supply of components and for recycling (PVC waste, glass and copper and aluminum scrap), carried out by a specialized company, apart from Joao Pessoa about 2,700 km. As for the other waste that cannot be reused, predicted up its focus on municipal landfill at a distance of 21.4 km.

#### 5.2.1.5 Mechanical Chiller

Recycling was estimated for polyurethane waste, aluminum and PVC, as well as copper scrap, with the company responsible for transporting these materials to own recycling company (distance estimated at 2,700 kilometers); as the other waste, it was considered that would be assigned to the municipal landfill (distance 21.4 km).

#### 5.2.1.6 Heat Exchangers

It was set recycling of PVC waste and scrap iron, steel and copper by a company specializing in the business (estimated distance of 2,700 km); and other waste disposed to the municipal landfill (distance 21.4 km).

#### 5.2.1.7 Cooling Tower

It was considered recycling by a specialized company (distance estimated at 2,700 kilometers) for glass fiber waste and scrap steel, iron and copper; as the other waste, it stipulated that would be directed to the municipal landfill (distance 21.4 km).

#### 5.2.1.8 Refrigeration machines by absorption

It was estimated the recycling by a specialized company, approximate distance in 2,700 km to PVC waste, glass and copper scrap and aluminum; other solid waste disposed in municipal landfills (approximate distance 21.4 km).

#### 5.2.1.9 Energy Resources

For natural gas and diesel oil were used processes in the software database Simapro. The composition was considered in the calculation for generating 1kWh energy of each fuel.

In the case of biomass, it was used as a source the sugarcane bagasse resulting from sugar manufacturing process alcohol, ease of supply, since in the state of Paraíba are cane sugar plants.

For conventional electricity were considered every step of the Electric Power System (EPS), and Generation, Transmission and Distribution to the delivery point of the hospital. The energy matrix used was based on information obtained in Information Preliminary Operating Daily issued by the National Electric System Operator (ONS, 2014), the load and power supply in northeastern Brazil by the National Interconnected System (SIN), with reference the average percentage seen in a day of the months of January, April, July and October. In this composition were considered 48.04% of the energy produced from hydroelectric, thermoelectric 44.58% and 7.38% wind (ONS, 2014).

### 5.3 Analysis of Environmental Impact

Table 5.3 shows the CO<sub>2</sub> equivalent emission data in kg for equipment used in the superstructure.

Table 5.3: CO<sub>2</sub> emissions for the superstructure equipment

Equipment	kg CO <sub>2</sub> -eq
Gas Engine	353
Diesel Generator	6,98 10 <sup>6</sup>
Steam boiler for the production of Biomass	2,73 10 <sup>6</sup>
Biomass boiler for hot water production	2,73 10 <sup>6</sup>
Boiler electricity for steam production	2,23 10 <sup>6</sup>
Boiler electricity for steam production	2,23 10 <sup>6</sup>
Natural gas boiler for steam production	2,23 10 <sup>6</sup>
Natural gas boiler for steam production	2,23 10 <sup>6</sup>
Heat exchanger - (Hot Water Vapor)	1,50 10 <sup>3</sup>
Heat exchanger - (Cooling Hot Water Water)	1,47 10 <sup>3</sup>
Cooling tower	9,71 10 <sup>3</sup>
Cooling machine by absorbing Single Acting	3,25 10 <sup>3</sup>
Cooling machine for Double Effect Absorption	2,47 10 <sup>3</sup>
Photovoltaic system	1,56 10 <sup>6</sup>
chiller Mechanical	1,39 10 <sup>4</sup>

Table 5.4: CO<sub>2</sub> emissions for 1 kWh of energy resource consumption.

Energy Resource	kg CO <sub>2</sub> -eq/kWh
Natural Gas	0.256
Diesel Oil	0.319
Biomass	0.147
Electricity	0.580

Among the equipment that make up the superstructure, it is observed that the diesel generator (Figure 5.2) is what contributes most negatively with the emission of CO<sub>2</sub> into the atmosphere during its lifetime, followed by boilers used to produce steam and water hot. The fact that it was considered in the process, sending the equipment, ground transportation, and after the end of that life, for a company specializing in disposal and remanufactured industrial equipment, 2,700 km from the hospital, strongly contributed to this amount of CO<sub>2</sub> emissions. The photovoltaic system (Figure 5.3) also stands in CO<sub>2</sub>emissions due to its import and the use of frequency inverters. As planned disposal also by independent experts, ground transportation to disposal site is an important process in the contribution of CO<sub>2</sub> emissions by the system.

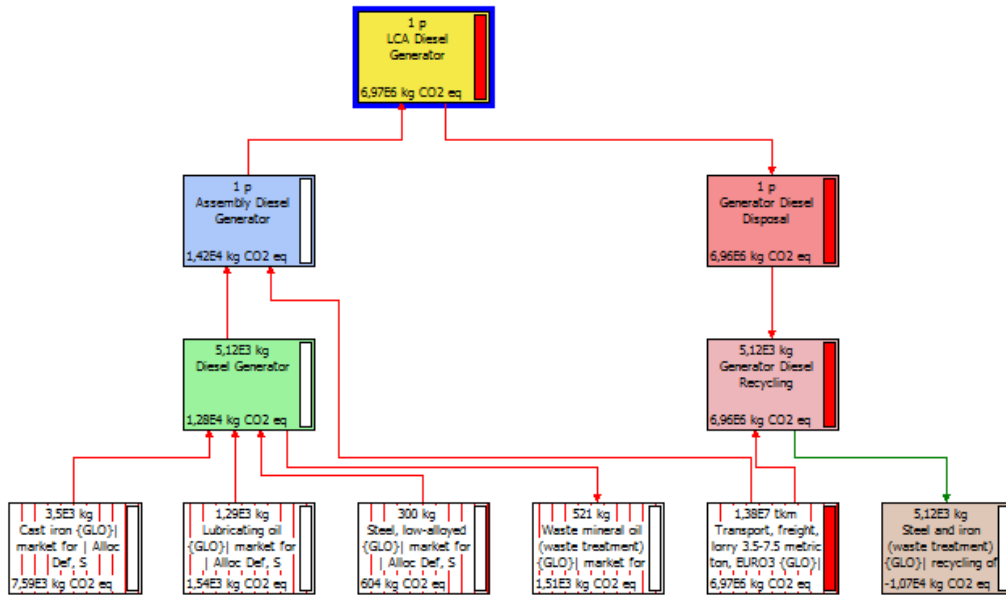


Figure 5.2: Environmental Load Network of Diesel Generator

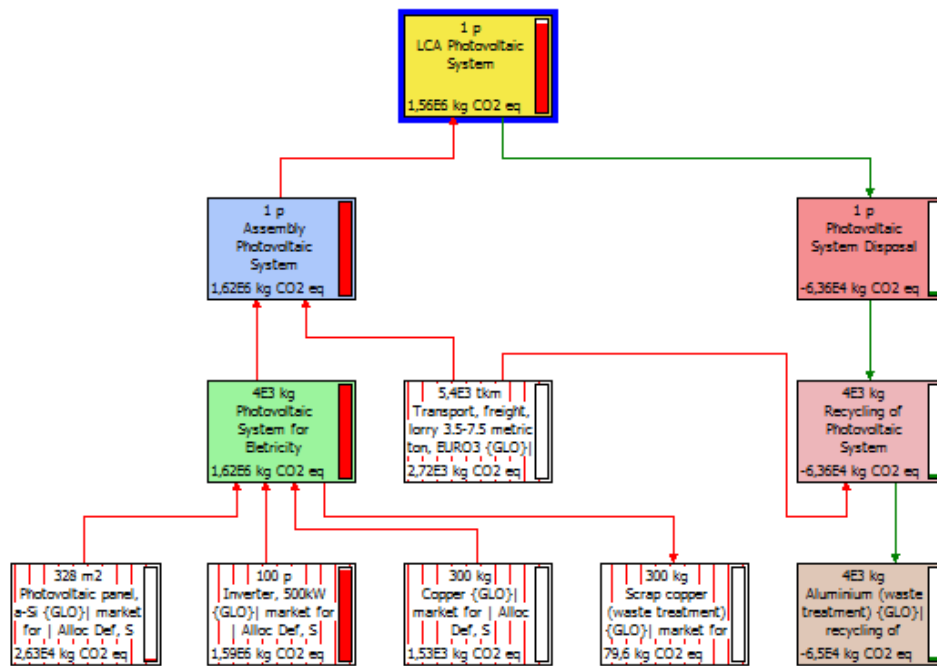


Figure 5.3: Environmental Load Network of Photovoltaic System

The equipment that was positively highlights in this superstructure, according to the data reported in Table 5.4 is the gas engine, since the manufacturer receives the equipment back after the useful life of reuse of the same (Figure 5.4).

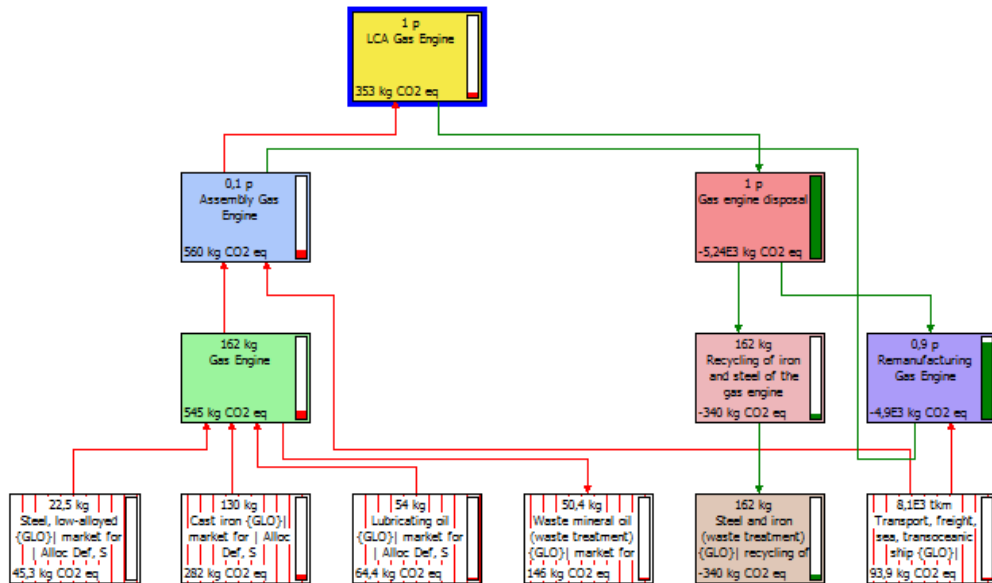


Figure 5.4: Environmental Load Network of Gas Engine

In the case of energy resources, the greatest amount of CO<sub>2</sub> emitted was the production of 1 kWh of conventional electricity as they have been considered in the process, all stages, from generation to point of consumption for the production of electricity.

Another factor analyzed on these features was the proximity of the University Hospital with Biomass plants, since the state of Paraíba has eight plants installed. By Table 4 it is clear that biomass bagasse from sugar cane was the feature that generated the least impact in terms of CO<sub>2</sub> emissions (0.147 kg CO<sub>2</sub>) for each kWh, compared to other commonly used fuels such as diesel, which showed 0.319 (kg CO<sub>2</sub>), and the very conventional electricity, which emits 0.580 kg CO<sub>2</sub> per kWh generated.

Also, in terms of price, biomass has more attractive price relative to other fuels, making it a great option to be subject including, enlarged, energy use of the enterprise.

When it comes to decision-making, one should not take into account only the cost of equipment or your lifetime, this is only the economic aspect, but all the benefits that will be produced during this time; this is where comes the concern for environmental issues and the resources employed in them.

The LCA proposed here aims to subsidize, through the equivalent CO<sub>2</sub> emissions information, the construction of an optimization design of the studied superstructure, seeking the setting equipment to have less environmental impact. In this context, it is

necessary to conduct further analysis of the indicators available, since, as it is a hospital, you may want to include health indicators in the study.

## 5.4 Conclusions

Adopting more efficient, economical equipment, and generate less emissions to the environment, it should be analyzed carefully by enterprises, especially by public sectors, as reflected directly on the image that your target audience will make of the brand; besides adding value to be adopted resources.

It is clear that a device that requires more energy resources, especially a fuel with a higher consumption compared to other, more negative will be the impact on the environment. Furthermore have higher maintenance requirements, and that is designed for a certain period of use, will not always (bearing in mind that the higher the usage, the greater the wear and damage of its physical components). This is where the life-cycle approach comes as through an analysis of the various equipment possibilities (and energy resources to be adopted), are taken into account numerous factors, particularly environmental, which over the cycle life of materials will determine what equipment will be most suitable for the project.

It is a thorough and qualitative study, which, though still little spread in Brazil, is an important environmental management tool because it is able to set goals (whether for equipment, for a sector or for a whole project), which will be seen previously, and managed throughout the period determined by the company.

The measurements provided here and will be studied in detail the decision criteria inserted in an energy supply optimization model to a hospital. To achieve reduction of environmental impacts goals, first must be quantified and then make disclosure.

O texto deste artigo difere ligeiramente da versão submetida ao “23<sup>rd</sup> *International Congress of Mechanical Engineering*” (COBEM), devido às observações e sugestões apresentadas pela banca examinadora.

## 5.5 References

ALPINA Equipamentos. Retrieved November 07, 2014, from <<http://www.alpina.com.br/novoe/catalogoppu.pdf>> (IN PORTUGUESE).

ART, PSI, EPFL, ETH, EMPA. "The Ecoinvent database". 29 Nov 2014. <<http://www.Ecoinvent.org/database/>>.

BITENCOURT, Fábio. "Sustainable Hospitals: A utopia component or survival?".09 Nov 2014 <<http://sei.ipog.edu.br:8090/upload/arquivo/1460/SUSTENTABILIDADELIVROUFBA180506.pdf>>.(IN PORTUGUESE)

BRASIL. Decreto N°. 76593 of 14 November 1975. "Establishing the National Program of Alcohol and other measures".05 Dec 2014 <<http://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1970-1979/decreto-76593-14-novembro-1975-425253-norma-pe.html>> (IN PORTUGUESE)

CARRIER. Turn to the experts. Retrieved November 07, 2014, from <<http://www.carrierdobrasil.com.br/modelo/descricao/meu-negocio/17/aquaforce-30xw>>.(IN PORTUGUESE)

CATERPILLAR. Retrieved November 13, 2014, from <[http://www.cat.com/en\\_US/products/new/power-systems/oil-and-gas-gas-compression-engines/18442763.html](http://www.cat.com/en_US/products/new/power-systems/oil-and-gas-gas-compression-engines/18442763.html)>.

COSTA, K. A. *The use of life cycle assessment in the decision-making process on sustainability in the construction industry in building sub-sector*. Thesis (Doctorate). Federal Fluminense University, 2012. (IN PORTUGUESE)

Brazilian Company of Hospital Services, EBSEH. "Lauro Wanderley University Hospital / UFPB: Scaling care services and educational and research management".08 Nov. 2014 <[http://www.ebserh.mec.gov.br/images/pdf/contratos\\_adesao\\_huf/ufpb/dimensionamento\\_de\\_servicos\\_hulw\\_ufpb.pdf](http://www.ebserh.mec.gov.br/images/pdf/contratos_adesao_huf/ufpb/dimensionamento_de_servicos_hulw_ufpb.pdf)>. (IN PORTUGUESE)

Brazilian Company of Hospital Services, EBSEH. "Restructuring plan of the University Hospital Lauro Wanderley: Federal University of Paraíba". 08 Nov. 2014: <

[http://ebserh.mec.gov.br/images/pdf/contratos\\_adesao\\_huf/ufpb/plano\\_de\\_reestruturacao\\_hulw\\_ufpb.pdf](http://ebserh.mec.gov.br/images/pdf/contratos_adesao_huf/ufpb/plano_de_reestruturacao_hulw_ufpb.pdf)>. (IN PORTUGUESE)

EVACON. 30 Anos com você. Retrieved November 05, 2014, from <[http://www.evacon.com.br/trocadores\\_de\\_calor/produtos.asp](http://www.evacon.com.br/trocadores_de_calor/produtos.asp)>. (IN PORTUGUESE)

Brazilian Institute of Geography and Statistics, IBGE. “Statistical profile of the city of João Pessoa-PB”. 08 Nov <<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?codmun=250750>>. (IN PORTUGUESE)

Company Research and Energy, EPE. “National Energy Balance 2014”. 23 Nov. 2014 <<https://ben.epe.gov.br/BENRelatorioSintese2014.aspx>>. (IN PORTUGUESE)

FERREIRA, Maria Juliana Guerra. *Integration of photovoltaic solar energy in Brazil*. Dissertation (Master). Universidade de São Paulo, 1993. (IN PORTUGUESE)

FULANA, Pere; PUIG, Rita. Notebooks Environment: Life Cycle Analysis. *Rubens Editorial*. Barcelona, 1997.

GOEDKOOOP, M.; OELE, M.; Schryver, A.; VIEIRA, M. “Pré Consultants. Simapro Database Manual”. 29 Nov 2014 < <http://www.pre-sustainability.com/download/manuals/DatabaseManualMethods.pdf>>.

HINZ, Roberta Tomasi Pires; VALENTINA Luiz V. Dalla; FRANCO, Ana Claudia. “Environmental sustainability of organizations through cleaner production or the Life Cycle Assessment”. 09 Nov 2014 <[http://revistas.unisinos.br/index.php/estudos\\_tecnologicos/article/view/6078](http://revistas.unisinos.br/index.php/estudos_tecnologicos/article/view/6078)>. (IN PORTUGUESE)

KYOCERA. Kyocera Brasil. Retrieved July 30, 2014, from <http://www.kyocera.com.br/>. (IN PORTUGUESE)

Ministry of Mines and Energy, MME. "Publications and Indicators. National Energy Balance, the base year 2013". Brasília – DF, 2014” .09 Nov 2014



[https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final\\_2014\\_Web.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/S%C3%ADntese%20do%20Relat%C3%B3rio%20Final_2014_Web.pdf)>. (IN PORTUGUESE)

MULTINOX, MULTINOX do Brasil. Retrieved July 23, 2015 <<http://www.multinoxdobrasil.com/caldeiras.html>>. (IN PORTUGUESE)

NBR ISO 14.040. “Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework”. 09 Nov 2014 <<http://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=40200>>. (IN PORTUGUESE)

ONS - National System Operator. 2014. "Daily operation Bulletin". 27 Mar 2014 Disponível em: <[http://www.ons.org.br/resultados\\_operacao/ipdo\\_new.aspx](http://www.ons.org.br/resultados_operacao/ipdo_new.aspx)>. Acesso em 27 mar 2015. (IN PORTUGUESE)

PréConsultants. 2015. SimaPro software. 13 Apr 2015 Disponível em: <[www.simapro.nl](http://www.simapro.nl)>.

Projeto EnerBuiLCA. 2012. “Explanatory Life Cycle Assessment applied to the construction sector”. 13 Apr 2015 <<http://www.interreg-sudoe.eu/contenidodinamico/libreria-ficheros/EFDEB073-3C69-3AC9-41D4-0603A70E0709.pdf>>

RAMOS, M. R. “Environmental management and competitive advantage: a case study in the Hotel Verdegreen”. Monograph (Graduate). State University of Paraíba, 2013. (IN PORTUGUESE)

RODRIGUES, D., MATAJS, R. 2004. “Sunbathing to Brazil. Sao Lourenco da Serra: Vitae Civilis” 13 Apr 2015 <<http://www.ufsj.edu.br/portal-repositorio/File/mestradoenergia/UmBanhoDeSol.pdf>>. (IN PORTUGUESE)

SALGADO, C. C. R.; COLOMBO, C. R.; AIRES, R. F. F. “Environmental management system in Verdegreen Hotel - João Pessoa / PB: A case study from the perspective of resource-based view”. 21 de Nov. 2014 <<http://semead6.tempsite.ws/17semead/resultado/trabalhosPDF/879.pdf>>. (IN PORTUGUESE)

SANTERNO. *Santerno Carraro Group-Giving energy more value*. Retrieved November 30, 2014 <<http://www.santerno.com.br/>>. (IN PORTUGUESE)

## Capítulo 6

### Artigo 4 – Life Cycle Analysis as a Decision Criterion for the Implementation of Solar Photovoltaic Panels in a Northeast Brazil Hospital

#### **Monica Carvalho**

Universidade Federal da Paraíba, Programa de Pós Graduação em Energias Renováveis, Centro de Energias Alternativas e Renováveis. Caixa Postal 5115, Cidade Universitária, João Pessoa - PB, 58059-970. Brasil. +55 83 3216 7268

#### **Danielle Bandeira de Mello Delgado**

Universidade Federal da Paraíba, Programa de Pós Graduação em Energias Renováveis, Centro de Energias Alternativas e Renováveis. Caixa Postal 5115, Cidade Universitária, João Pessoa - PB, 58059-970. Brasil. +55 83 3216 7268

#### **Ricardo Chacartegui**

University of Seville, Higher Technical School of Industrial Engineering. Camino de los Descubrimientos s/n, 41092 Seville, Spain. +34 954 48 72 43ricardoch@us.es

#### **ABSTRACT**

The environmental performance of products, services and processes has become one of the key issues in today's world, and it is important to examine ways in which negative effects on the environment are assessed. Life Cycle Analysis (LCA) is one of the most utilized, popular and validated methodologies to quantify environmental impacts, encompassing the extraction of raw materials, manufacture, transportation or distribution, utilization, and final waste scenario. One of the reasons for undertaking a Life Cycle Analysis study is that there are growing concerns about a variety of environmental issues expressed by public opinion, political bodies and industry. Energy use and its associated primary energy consumption and emissions are important contributors to the life cycle impacts of many products and processes, as well as to greenhouse gas inventories of entities, products, and countries. LCA can be used to calculate the environmental loads (e.g., emissions of greenhouse gases) associated with the consumption of units of energy (electricity, heat, coolth, for instance). In this way, energy supply systems can be ranked according to their corresponding emissions of greenhouse gases. The advantage of analyzing full life cycles as opposed to using only emission factors is that renewable systems can be compared with systems based on fossil fuel

combustion. The novelty presented herein is two-fold: i) utilization of environmental data obtained from application of the LCA technique as a decision criterion at the time of optimizing an energy supply system, and ii) application of the methodology to a hospital located in Northeast Brazil. Regarding the state of LCA in Brazil, most of the studies have been undertaken in the South and Southeast regions - therefore the application to the Northeast region could help disseminate good practice. The energy supply system is optimized through the solution of an optimization model based on Mixed Integer Linear Programming (MILP). The optimization encompasses the configuration of the system (type and number of equipments installed) simultaneously with the operational strategy (how each equipment operates), providing an energy supply system with minimum environmental impacts. These environmental impacts are associated with the production of each piece of equipment installed and the consumption of energy resources (natural gas, diesel, biomass, etc). The objective function to be minimized considered initially the CO<sub>2</sub>-equivalent emissions, as established by the IPCC GWP 100a method (concerned with global warming). The energy supply system was optimized considering specific energy demands of a Northeast Brazil hospital, starting from a superstructure that included cogeneration modules, boilers, chillers, heat exchangers and even the possibility of installing photovoltaic (PV) solar panels for the production of electricity. Also considered was the possibility that electricity produced by the PV panels could be fed into the electric grid, in accordance with legal regulations, and consequently realize economic benefits. The results of the optimization are interesting because they reveal the most environmentally-friendly energy supply system to be installed, which is in line with current research that focuses on utilizing environmental criteria to aid in decision making.

## 6.1 Introduction

The environmental performance of products, services and processes has become one of the key issues in today's world, and it is important to examine ways in which negative effects on the environment are assessed. One of the reasons for undertaking a Life Cycle Analysis (LCA) study is that there are growing concerns about a variety of environmental issues expressed by public opinion, political bodies and industry. Environmental concern may be related to the long-term resource base of human societies or may be more health related or it may be a concern for the natural environment as such (Baumann & Tillman, 2004). LCA is one of the tools that can be used for such a purpose.

LCA can be defined as the ‘‘compilation and evaluation of the inputs, outputs and potential environmental impacts of a product system throughout its life cycle’’ (Guinee *et al.*, 2001). The objective of LCA is to describe and evaluate the overall environmental impacts of a certain action by analyzing all stages of the entire process from raw materials supply, production, transport and energy generation to recycling and disposal stages - following actual use, in other words, ‘‘from the cradle to the grave’’ (WEC, 2004). The

environmental burden covers all types of impacts upon the environment, including extraction of different types of resources, emission of hazardous substances and different types of land use. The term ‘product’ is taken in its broadest sense – including physical goods as well as services; it includes goods and services at both operational and strategic levels (Guinee *et al.*, 2001).

Energy use and its associated primary energy consumption and emissions are important contributors to the life cycle impacts of many products and processes, as well as to greenhouse gas inventories of entities, products, and countries. LCA can be used to calculate the environmental loads (e.g., emissions of greenhouse gases) associated with the consumption of units of energy (electricity, heat, coolth, for instance). In this way, alternative systems may be ranked according to their respective emissions of greenhouse gases. The advantage of analyzing full life cycles as opposed to using only emission factors is that renewable and nuclear systems with no direct (stack) emissions can be compared with systems based on fossil fuel combustion (WEC, 2004).

There are actually two innovations presented herein: i) utilization of environmental data in the objective function of a mathematical model for the optimization of an energy supply system, and ii) application of the methodology to a hospital located in Northeast Brazil. Regarding the state of LCA in Brazil, most of the studies have been undertaken in the South and Southeast regions - therefore the application to the Northeast region could help disseminate good practice. The energy supply system is optimized through the solution of an optimization model based on Mixed Integer Linear Programming (MILP). The optimization encompasses the configuration of the system simultaneously with the operational strategy, providing an energy supply system with minimum environmental impacts. These environmental impacts are associated with the production of each piece of equipment installed plus the consumption of energy resources (natural gas, diesel, biomass, etc) to satisfy the energy demands of the consumer center.

## 6.2 Polygeneration System

The study case is a university hospital, with 420 beds, located in the city of João Pessoa (Northeast Brazil). The energy demands considered were electricity (lighting and equipment), hot water (internal consumption of the hospital), steam (laundry) and coolth (a/c for comfort). Hospitals are good study cases for optimization because they present regular, stable energy demands. The study considered an entire operational year,

subdivided into two representative days per month (weekday and holiday/weekend), with 24 hourly periods each.

Real electricity data was provided by the hospital. Coolth, hot water and steam demands were disaggregated through the utilization of climate data, degree-days method, occupation and energy audit data (Erbs, Klein & Beckham, 1983; Climaticus 4.2, 2005; Nepote, Monteiro & Hardy, 2009; Araújo, 2004). The hospital presents the following annual energy demands: 2791 MWh of electricity, 1947 MWh of hot water, 138 MWh of steam, and 2309 MWh of coolth. Table 6.1 shows the energy demands for the hospital, throughout the year.

Table 6.1: Energy demands of the hospital.

Month Representative Day	n <sub>d</sub> (days/year)	Electricity	Hot Water	Steam	Coolth
		Total MWh/day	Total MWh/day	Total MWh/day	Total MWh/day
Jan w*	20	8538	3543	0.465	5961
Jan h**	11	6315	3543	0.233	4360
Feb w	19	9696	6436	0.465	6472
Feb h	9	6247	6436	0.233	4290
Mar w	20	9861	6436	0.465	8013
Mar h	11	7474	6436	0.233	5443
Apr w	20	9949	6436	0.465	7071
Apr h	10	7348	6436	0.233	4737
May w	20	8901	6436	0.465	7895
May h	11	6383	6436	0.233	5534
Jun w	19	7489	5032	0.465	7768
Jun h	11	6832	5032	0.233	5259
Jul w	20	6568	3881	0.465	5186
Jul h	11	6045	3881	0.233	3760
Aug w	20	5954	3881	0.465	7343
Aug h	11	4681	3881	0.233	4941
Sep w	21	6686	3881	0.465	7483
Sep h	9	4755	3881	0.233	5046
Oct w	20	8041	5284	0.465	8834
Oct h	11	5969	5284	0.233	6057
Nov w	20	9309	6436	0.465	8260
Nov h	10	6022	6436	0.233	5627
Dec w	20	10360	6436	0.465	5912
Dec h	11	7389	6436	0.233	3879
Σ		MWh/year	MWh/year	MWh/year	MWh/year
Ano	365	2791	1947	138	2309

\*w = weekday; \*\* h = holiday/weekend

One of the major steps in Mixed Integer Programming is the definition of a superstructure that represents all options available for equipment and energy resources. Figure 6.1 depicts the superstructure of the energy supply system for the hospital located in João Pessoa, following the scheme of Carvalho & Millar (2012).

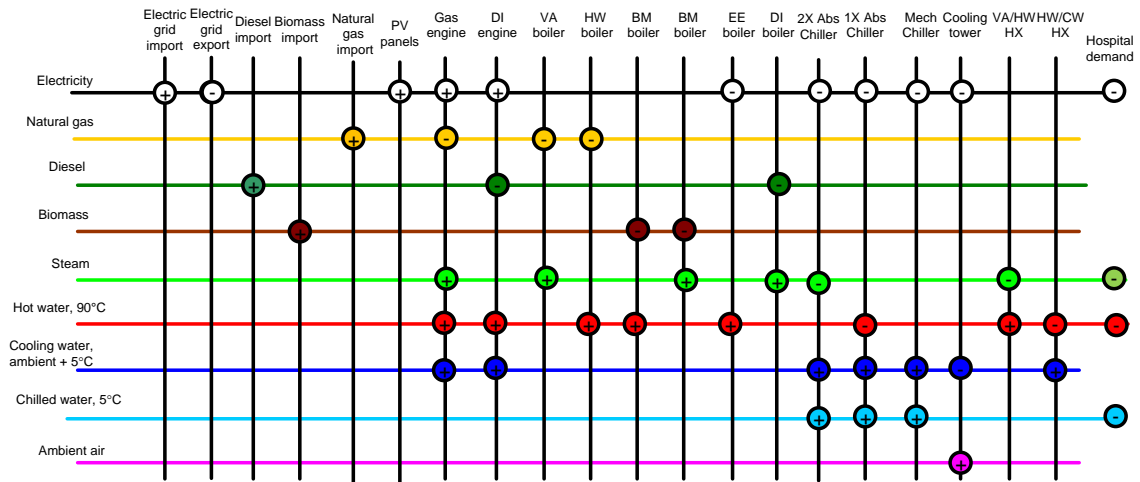


Figure 6.1: Superstructure illustrating all potential conversion pathways considered.

The available utilities were electricity (EE), diesel (DI), biomass (BM), Natural gas (NG), steam (VA, 180°C), hot water (HW, 90°C), cooling water (CW,  $t_0 + 5^\circ\text{C}$ ), ambient air ( $t_0^\circ\text{C}$ ), and chilled water (CO, 5°C). A positive node denotes supply/production of energy and a negative node denotes consumption. The horizontal lines represent the energy forms considered at the site, into which the equipment (vertical lines) are connected to consume or produce energy.

Table 6.2 shows the technical and economic characteristics of the equipment that belong to the superstructure (Figure 6.1). The rows indicate the technologies available, and the columns indicate the energy resources. The coefficient in bold indicates the flow that defines the productive capacity of the equipment, and positive and negative coefficients, indicate, respectively, that an energy flow is either produced or consumed. At the time of writing, 1 US\$ = 2.50 R\$.

Table 6.2: Matrix of technical production coefficients and technology data (Carvalho, Romero & Millar, 2014).

	Technical production coefficients									Equipment		
	GN	BM	DI	VA	AQ	AR	AA	AF	EE	Cost CINV (10 <sup>3</sup> US\$)	Cost O&M (US\$/MWh)	Nom. Power PNOM (MW)
Gas engine	-2.63				1.10	0.45			1	185.00	6.00	0.41
Diesel engine			-2.66		0.80	0.50			1	90.80	6.00	0.36
Steam boiler (BM)		-1.40		1						20.40	3.20	0.25
Steam boiler (GN)	-1.18			1						21.29	0.89	0.30
Steam boiler (EE)				1					-1.15	20.40	0.89	0.15
HX (VA-AQ)				-1.10	1					3.56	0.89	0.40
Hot water boiler (BM)		-1.25			1					25.00	3.20	0.17
Hot water boiler (GN)	-1.22				1					19.72	0.89	0.30
Hot water boiler(EE)					1				-1.11	11.28	0.89	0.15
HX(AQ-AR)					-1.10	1				2.96	0.89	0.40
Absorption chil (2x)				-0.77		1.77		1	-0.01	186.08	4.00	0.46
Absorption chil (1x)					-1.32	2.32		1	-0.01	215.88	4.00	0.49
Mechanical chiller						1.21		1	-0.21	58.00	1.77	0.28
Cooling Tower						-1.00	1		-0.02	11.28	4.00	1.00

The PV system is constituted by PV panels and inverters (electricity storage will not be considered). Information was obtained from consultation to PV panel (Kyocera, 2014) and inverter (Santerno, 2014) manufacturers. The cost of the system was US\$ 880/panel (including the cost for the panel, inverter, installation materials, transportation and assembly). The area of each panel is 1.64 m<sup>2</sup>. The maintenance costs are US\$ 10/m<sup>2</sup> per year. As the geographic latitude of the municipality of João Pessoa is 07° S, the inclination angle of the panels to be installed in the hospital must be 10°. Historic hourly radiation data (W/m<sup>2</sup>) were available from the CLIMATICUS database (2005).

Electricity was charged with an hour-seasonal tariff, presenting differentiated tariffs for peak and off-peak periods: US\$51.60/MWh for off-peak periods, and between 18h and 21h the peak value was US\$79.60/MWh. Steam demand was considered constant during the period in which the sterilization central was open, during 6h and 20h, in addition to the steam demand of a hot counter in the restaurant, during lunch and supper times. The hot water demand presents two contributions: laundry (operating between 8h and 18h), and the internal use of the hospital (no interruptions). The tariff for natural gas (US\$48/MWh – PBGAS, 2013) does not include hourly or seasonal differentiation, as is the case of diesel (US\$59.60/MWh). Due to the location of João Pessoa, the biomass considered herein originates from sugar cane bagasse, and the final price was US\$ 13.20/MWh (considering 15.40 MJ/kg dry matter and 0.787 dry matter/kg).

A lifetime of 15 years was considered for the system, with an interest rate of 10% y<sup>-1</sup>, obtaining a capital recovery factor of 0.13 y<sup>-1</sup>. The system was designed to interact with the electric grid also through the export of autogenerated electricity, considering the

credit compensation scheme set out by BRASIL (2012). In this energy compensation system, surplus generated electricity can be fed into the distribution grid and registered as energy credits, which can be consumed in up to 36 months. This special regime for electricity exports applies to photovoltaic- and natural gas- produced electricity. Finally, the problem to be solved consists of two simultaneous tasks: selection of the combination of technologies (type and power installed) that are capable of meeting the energy demands of the hospital, and establishment of the operation mode for all equipment installed, for each time interval defined.

### 6.3 Life Cycle Analysis

It takes considerable effort to conduct an LCA study, exploring large industrial systems, collecting and analyzing a great amount of environmental information (Baumann & Tillman, 2004). A brief overview of the basic LCA process is provided for context when interpreting the findings. A framework for LCA has been standardized by the International Organization for Standardization (ISO) in the ISO 14040 series (ISO 14040, 2006; ISO 14044, 2006). This LCA framework consists of the following elements (Carvalho, Serra & Lozano, 2011): (1) Goal and Scope definition, which specifies the goal and intended use of the LCA and delineates the assessment (system boundaries, function and flow, required data quality, technology and assessment parameters); (2) Life Cycle Inventory analysis (LCI), which includes the collection of data on inputs and outputs for all processes in the product system; (3) Life Cycle Impact Assessment (LCIA), which translates inventory data on inputs and outputs into indicators about the product system's potential impacts on the environment, human health, and availability of natural resources; and (4) Interpretation, the phase where the results of the LCI and LCIA are interpreted according to the goal of the study and where sensitivity and uncertainty analysis are performed to qualify the results and conclusions.

Because of the potential impacts of global warming and its associated climate change, greenhouse gases (GHG) were chosen to represent the environmental loads. The more general category name climate change replaced the formerly used greenhouse effect and global warming (Udo de Haes, 2002). Because the average tropospheric lifetime of all greenhouse gases, even of the relatively short-lived ones (CH<sub>4</sub>, about 10 years), exceeds the tropospheric mixing time (about 1 year), it is not important where the emissions occur. Climate change is therefore a truly global impact category (Udo de Haes, 2002).



Although the geographic scale of GHG emissions is global, special care must be taken at the time of defining the LCA processes and data utilized, as the results will vary greatly if, for example, different production methods and transportation are used. This will result in a great difference in environmental loads if natural gas is consumed in Spain (originating from Algeria, liquefied, transported in Liquefied Natural Gas carriers, and regasified before being distributed via pipelines) or Canada (originating from the province of Alberta, transported and distributed in pipelines).

The impact evaluation method chosen to represent the environmental loads was the 2013 version of IPCC, which expresses environmental impacts in kg CO<sub>2</sub>-eq after atmospheric emissions are quantified and multiplied by a conversion factor (IPCC, 2014). The reader is directed to IPCC (2014) for a more complete description of the method. Software SimaPro v. 8.0.4 (PréConsultants, 2015) was utilized for the quantification of environmental impacts, and the database utilized was EcoInvent version 3 (EcoInvent, 2014).

### 6.3.1 Equipment

For each item present in the superstructure (Figure 6.1), the environmental emissions were calculated as the sum of the partial emissions for each stage (construction, operation and maintenance, and dismantlement and disposal). Data on the material composition of each piece of equipment were obtained after exhaustive and extensive consultation of catalogues and manufacturers. Table 6.3 shows the main material composition and CO<sub>2</sub>-eq emissions associated (COE).

Table 6.3: Main material composition of technologies and corresponding environmental emissions.

	Main material composition	COE kg CO <sub>2</sub> -eq
Gas engine	Cast iron 1300 kg, Oil 540 kg, Low-alloyed steel 225 kg, PVC 5 kg, Steel sheet 2 m <sup>2</sup>	3.53 10 <sup>2</sup>
Diesel engine	Cast iron 3500 kg, Oil 1292 kg, Low-alloyed steel 300 kg, Rubber 50kg, Copper 105 kg	6.98 10 <sup>6</sup>
Steam boil (BM)	Chromium steel 1980 kg, Copper 50 kg, PVC 10 kg	2.73 10 <sup>3</sup>
Steam boil (GN)	Rock wool 115 kg, Al sheet 14 m <sup>2</sup> , Stainless steel 980 kg, low-alloyed steel 490 kg	2.23 10 <sup>6</sup>
Steam boil (EE)	wool 115 kg, Al sheet 14 m <sup>2</sup> , Stainless steel 980 kg, low-alloyed steel 490 kg	2.23 10 <sup>6</sup>
HX (VA-AQ)	Fe-Ni-Cr allow 94 kg, Epoxy resin 0.5 kg, Titanium dioxide 3 kg	1.50 10 <sup>3</sup>
Hot water boil (BM)	Chromium steel 1980 kg, Copper 50 kg, PVC 10 kg	2.73 10 <sup>3</sup>
Hot water boil (GN)	Rock wool 115 kg, Al sheet 14 m <sup>2</sup> , Stainless steel 980 kg, low-alloyed steel 490 kg	2.23 10 <sup>6</sup>
Hot water boil (EE)	Rock wool 115 kg, Al sheet 14 m <sup>2</sup> , Stainless steel 980 kg, low-alloyed steel 490 kg	2.23 10 <sup>6</sup>
HX(AQ-AR)	Titanium dioxide 2 kg, Fe-Ni-Cr alloy 75 kg, Epoxy resin 0.5 kg	1.47 10 <sup>3</sup>
Absorption chil (2x)	Li-Br 1600 kg, Stainless steel 7338 kg, Copper 30kg, PVC 10 kg	2.47 10 <sup>5</sup>
Absorption chil (1x)	Li-Br 2200 kg, Stainless steel 7418 kg, Copper 30 kg, PVC 10 kg	3.25 10 <sup>5</sup>
Mechanical chiller	Polyurethane 30 kg, Stainless steel 2000 kg, Copper 30 kg, PVC 10 kg	1.39 10 <sup>4</sup>
Cooling Tower	Glass fiber 2622 kg, Cast iron 200 kg, Copper 10 kg, PVC 10 kg, Steel sheet 1 m <sup>2</sup>	9.71 10 <sup>3</sup>
PV panel	PV panel 1.64 m <sup>2</sup> , Inverter 1, Copper 1.5 kg, PVC 0.125 kg, Steel sheet 0.005 m <sup>2</sup>	7.80 10 <sup>3</sup>

The best available disposal scenario was considered for each material (recycling), and all waste flows (lubricating oil, wastewater, Li-Br, etc) received adequate treatment before disposal. The exception was the gas engine, which in its specific case considered reuse of materials by the manufacturer, resulting in the impressive low emissions shown in Table 6.3. All recycling options also considered transportation to the recycling site, which significantly contributed to the final emissions, as a distance of 2200 km was considered (the recycling site is located in São Paulo, Southeast Brazil).

### 6.3.2 Energy utilities

Special care was taken to correctly adapt each existing process that would be applicable to the optimization study herein presented. For the electricity mix, a 2014 average was considered (ONS, 2014) for the state of Paraíba: hydro 48.04%, thermoelectrical (oil) 44.58%, and eolic 7.38%. Considering these percentages, the final emissions associated with the consumption of 1 kWh from the electric grid were 0,580 kg CO<sub>2</sub>-eq. This figure is very different from the overall Brazilian electricity mix, which presents a much lower carbon content.

For the sugar cane bagasse, the emissions were 0.147 kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh. These emissions already take into account the drying of the bagasse. For natural gas, the emissions were 0.256 kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh consumed, and for diesel, 0.319 kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh consumed. Please note that these emissions refer to the consumption of one energy unit of the utility; however, the optimization model will consider adequate conversion (Table 6.2) to different energy forms. For example, the diesel generator will produce electricity at 0.848 kg CO<sub>2</sub>-eq/kWh, considering its electrical efficiency ( $1/2.66 = 37,6\%$ ).

The system boundaries were defined as in Figure 6.2, where the selfgenerated electricity exported to the electric grid is evaluated at the same “environmental impact” as the electricity imported from the grid, introducing the concept of avoided emissions as the emissions avoided elsewhere by the production of electricity by the PV panels (avoiding the purchase of electricity from the grid).

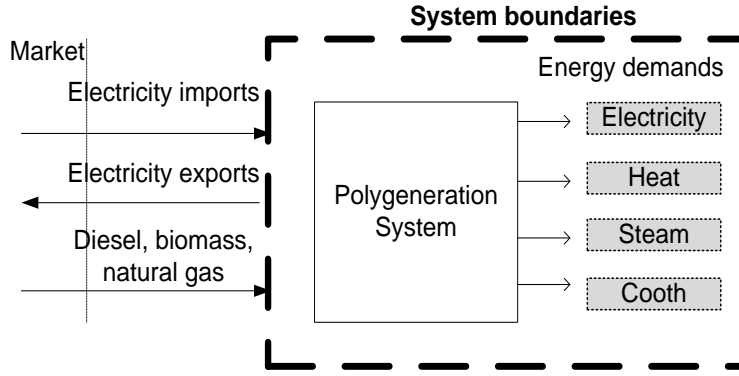


Figure 6.2: Boundaries of the polygeneration system.

### 6.3.3 Optimization Model

A combinatorial optimization method, based on mathematical programming (MILP), determines the optimal design and operation for the energy supply system. The optimization model was implemented in LINGO 14.0 (2015), an optimization tool that utilizes the combination of branch and bound and simplex methods in its solution algorithm. The environmental objective function was the minimization of the total annual impact ( $CO_{tot}$ ):

$$\text{Min } CO_{tot} = CO_{fix} + CO_{ope} \quad (6.1)$$

Where  $CO_{fix}$  referred to the impact associated with the installation of equipment, and  $CO_{ope}$  referred to the consumption of energy utilities to satisfy the energy demands of the hospital. Then:

$$CO_{fix} = fam_e \cdot \sum_i [NEI(i) \cdot COE(i) + PV] \quad (6.2)$$

where  $NEI(i)$  and  $COE(i)$  are, respectively, number of pieces of equipment installed for technology  $i$  and the  $CO_2$  emissions for the production of each piece of equipment.  $PV$  refers to the PV panels. The environmental amortization factor  $fam_e$  allocates the global emissions throughout the lifetime of the system, and was  $0.10 \text{ y}^{-1}$ .

Considering that the year was divided into  $d$  representative days, which were in turn subdivided into  $h$  hours,  $(d,h)$  represented the  $h$ th hour of the  $d$ th representative day. The annual operation impact ( $CO_{ope}$ ), associated with the operation of the system was expressed by:

$$CO_{ope} = \sum_d \sum_h [CO_{ng} \cdot F_{ng}(d, h) + CO_{ee} \cdot E_p(d, h) - CO_{ee} \cdot E_s(d, h) + CO_{bm} \cdot F_{bm}(d, h) + CO_{di} \cdot F_{di}(d, h)] \quad (6.3)$$

where CO refers to the emissions associated with the consumption of the different utilities: ng (natural gas), ee (electricity), bm (biomass), and di (diesel). F refers to the amount imported for each fuel,  $E_p$  refers to electricity imported from the grid and  $E_s$  refers to electricity exported to the grid (and therefore counted as avoided emissions). Equations (6.1-6.3) can be changed to consider economic costs. Capacity limits, production restrictions, and balance equations were enforced in the optimization model.

Capacity limits: For each period (d,h) and for each technology i

$$POE(i, d, h) \leq NIN(i) \cdot P_{nom}(i) \quad (6.4)$$

where  $POE(i,d,h)$  is the energy production of technology i in the period (d,h), and  $P_{nom}$  is the nominal power of the equipment.

Production restrictions: For each period (d,h) and for cogeneration modules, the production of energy was restricted to:

$$POE(i, d, h) = NES(i, d, h) \cdot P_{nom}(i) \quad \text{with } NOP(i, d, h) \in \{0,1, \dots, NEI(i)\} \quad (6.5)$$

where  $NES(i,d,h)$  is the number of operational equipment of technology i in the period (d,h). For each technology i, For each utility j ,

$$UI(i, j, d, h) = PC(i, j) \cdot POE(i, d, h) \quad (6.6)$$

where  $UI(i,j,d,h)$  is the energy flow of utility j interchanged with technology i in the period (d,h) and  $PC(i,j)$  is the absolute value of the production coefficient (Table 6.2).

Balance equations: For each period (d,h) and for each utility j:

$$Prod(j, d, h) - Cons(j, d, h) + Imp(j, d, h) - Exp(j, d, h) - Waste(j, d, h) - Demand(j, d, h) = 0 \quad (6.7)$$

$$Prod(j, d, h) = \sum_i X(i, j, d, h) \cdot YTUP(i, j) \quad \text{with } YTUP(i, j) \in \{0,1\} \quad (6.8)$$

$$Cons(j, d, h) = \sum_i X(i, j, d, h) \cdot YTUC(i, j) \quad \text{with } YTUC(i, j) \in \{0,1\} \quad (6.9)$$

$$Imp(j, d, h) \leq YUP(j) \cdot (Cons(j, d, h) + D(j, d, h)) \quad \text{with } YUI(j) \in \{0,1\} \quad (6.10)$$

$$Exp(j, d, h) \leq YUS(j) \cdot Prod(j, d, h) \quad \text{with } YUE(j) \in \{0,1\} \quad (6.11)$$

$$Waste(j, d, h) \leq YUW(j) \cdot Prod(j, d, h) \quad \text{with } YUW(j) \in \{0,1\} \quad (6.12)$$

$$Demand(j, d, h) \leq YUD(j) \cdot (Prod(j, d, h) + P(j, d, h)) \quad \text{with } YUD(j) \in \{0,1\} \quad (6.13)$$

$YTUP(i,j)$  was 1 when technology i produced utility j.  $YTUC(i,j)$  was 1 when technology i consumed utility j. Production (Prod), and Consumption (Cons) corresponded

to internal utility flows. Imports(Imp), Exports (Exp), Waste and Demand correspond to the utility flows interchanged between the energy system and the market environment. Binary variables YUI(j), YUE(j), YUW(j) and YUD(j) indicated, respectively, the possibility of such interchanges.

## 6.4 Results and Discussion

The main criterion chosen to carry out the optimization of the energy supply system was the total annual emissions (kg CO<sub>2</sub>-eq/year). Table 6.4 presents the results for the optimizations carried out, considering that there are 200 PV panels available for installation.

Table 6.4 presents three optimal solutions: economic and environmental optimals, and a reference solution. The reference solution reflects the conventional way of installing energy supply systems: restrictions were introduced within the optimization model to prevent PV panels and biomass-driven equipment to be installed, while also excluding the possibility of installing cogeneration modules and absorption chillers.

Table 6.4: Minimum annual cost for the polygeneration system with 200 PV panels installed.

	Economic Optimal		Reference system*		CO <sub>2</sub> -eq optimal	
<b>Composition of system</b>	Number (Installed Power)		Number (Installed Power)		Number (Installed Power)	
Gas engine	0 (0 MW)		- (0 MW)		1 (0.41 MW)	
Diesel engine	0 (0 MW)		- (0 MW)		0 (0 MW)	
Steam boiler (GN)	0 (0 MW)		1 (0.300 MW)		0 (0 MW)	
Steam boiler (BM)	1 (0.250 MW)		0 (0 MW)		1 (0.25 MW)	
Steam boiler (EE)	0 (0 MW)		0 (0 MW)		0 (0 MW)	
Heat exchanger (VA-AQ)	1 (0.400 MW)		1 (0.400 MW)		1 (0.40 MW)	
Hot water boiler (GN)	0 (0 MW)		1 (0.300 MW)		0 (0 MW)	
Hot water boiler (BM)	2 (0.340 MW)		0 (0 MW)		1 (0.17 MW)	
Hot water boiler (EE)	1 (0.150 MW)		1 (0.150 MW)		0 (0 MW)	
Heat exchanger (AQ-AR)	0 (0 MW)		0 (0 MW)		1 (0.40 MW)	
Double-effect absorption chiller	0 (0 MW)		0 (0 MW)		0 (0 MW)	
Single-effect absorption chiller	0 (0 MW)		0 (0 MW)		1 (0.49 MW)	
Mechanical chiller	3 (0.810 MW)		3 (0.810 MW)		3 (0.81 MW)	
Cooling tower	1 (1.000 MW)		1 (1.000 MW)		2 (2.00 MW)	
Photovoltaic panels	200 units		--		200 units	
Electricity imports	3244 MWh/year		4281 MWh/year		297 MWh/year	
Electricity produced by PV panels	129 MWh/year		--		129 MWh/year	
Electricity credits	--		--		760 MWh/year	
Natural gas imports	--		1528 MWh/year		9554 MWh/year	
Diesel imports	--		--		--	
Biomass imports	2663 MWh/year		--		281 MWh/year	
Initial investment in equipment	US\$	587,089	US\$	374,670	US\$	1,022,892
Annual cost of electricity imports	US\$/year	180,489	US\$/year	233,979	US\$/year	15,342
Annual credit with electricity exports	US\$/year	--	US\$/year	--	US\$/year	43,488
Annual cost of natural gas imports	US\$/year	--	US\$/year	73,335	US\$/year	458,576
Annual cost of diesel imports	US\$/year	--	US\$/year	--	US\$/year	--
Annual cost of biomass imports	US\$/year	35,150	US\$/year	--	US\$/year	3708
Operation and Maintenance costs	US\$/year	21,813	US\$/year	16,716	US\$/year	53,519
Annual cost of equipment**	US\$/year	76,322	US\$/year	48,707	US\$/year	132,976
<b>TOTAL annual cost</b>	<b>US\$/year</b>	<b>331,774</b>	<b>US\$/year</b>	<b>372,758</b>	<b>US\$/year</b>	<b>620,633</b>
CO <sub>2</sub> emissions for equipment only	kg CO <sub>2</sub> -eq/year	3,851,100	kg CO <sub>2</sub> -eq/year	2,291,100	kg CO <sub>2</sub> -eq/year	1,954,903
CO <sub>2</sub> -eq emissions for electricity imports	kg CO <sub>2</sub> -eq/year	1,881,711	kg CO <sub>2</sub> -eq/year	2,482,917	kg CO <sub>2</sub> -eq/year	172,222
CO <sub>2</sub> -eq emissions for electricity exports	kg CO <sub>2</sub> -eq/year	--	kg CO <sub>2</sub> -eq/year	--	kg CO <sub>2</sub> -eq/year	441,039
CO <sub>2</sub> -eq emissions for natural gas imports	kg CO <sub>2</sub> -eq/year	--	kg CO <sub>2</sub> -eq/year	391,230	kg CO <sub>2</sub> -eq/year	2,445,736
CO <sub>2</sub> -eq emissions for diesel imports	kg CO <sub>2</sub> -eq/year	--	kg CO <sub>2</sub> -eq/year	--	kg CO <sub>2</sub> -eq/year	--
CO <sub>2</sub> -eq emissions for biomass imports	kg CO <sub>2</sub> -eq/year	391,448	kg CO <sub>2</sub> -eq/year	--	kg CO <sub>2</sub> -eq/year	41,296
CO <sub>2</sub> -eq emissions for equipment**	kg CO <sub>2</sub> -eq/year	385,110	kg CO <sub>2</sub> -eq/year	674,291	kg CO <sub>2</sub> -eq/year	195,490
<b>TOTAL annual CO<sub>2</sub>-eq emissions</b>	<b>kg CO<sub>2</sub>-eq/year</b>	<b>2,658,269</b>	<b>kg CO<sub>2</sub>-eq/year</b>	<b>3,548,438</b>	<b>kg CO<sub>2</sub>-eq/year</b>	<b>2,557,232</b>

The reference solution installed hot water and steam boilers that operated on natural gas, as well as one electrical boiler. All the electricity necessary to supply the hospital was purchased directly from the grid. The cooling demand was met by mechanical chillers. This solution presented the worst environmental emissions, almost 40% higher than those of the environmental optimal.

When optimizing the system applying the economic criteria, the system took advantage of the lower purchase cost of biomass and imported 2663 MWh/year for this energy source to operate boilers. For the economic optimal, steam-hot water heat

exchangers, and exclusively mechanical chillers were installed. Electricity was used to drive the mechanical chillers and auxiliary machinery in this system.

A very different configuration was obtained for the environmental optimal (Figure 6.3): a natural gas engine with heat recovery was installed for the production of electricity. In Figure 6.3, the installed equipment is shown in bold, while available but not installed equipment are shown in gray. Only biomass boilers were installed along with both types of heat exchangers (steam-hot water and hot water-refrigeration water). Electricity was supplied to users by operating the gas engine cogeneration module, by the production of the PV panels, and by purchasing a small quantity from an outside electric power company. The environmental optimal suggested that environmental benefits are realized through electricity exports. Trigenation was installed in this case, as the cold water for space cooling was supplied by the single effect absorption chiller and mechanical chillers. Surplus not-consumed cogenerated heat was disposed of through heat exchangers. This result was not totally unexpected as trigenation systems have long been seen as good alternatives to reduce emissions; however, the potential to reduce emissions depends also on the electricity mix supplied to the system.

Distributed energy resource systems have been recognized as an environmentally-friendly in comparison with conventional energy systems, as mentioned by Ren *et al.* (2010); these systems can employ combined heat and power systems, PV systems, etc. and help address global environmental problems. Saner *et al.* (2014) optimized the energy supply for a Swiss building considering greenhouse gas emissions and particulate matter formation, with a drastic shift from fossil fuel-dominated system to a biomass-dominated system. You (2012) and Carvalho, Serra & Lozano (2011) have obtained divergent solutions when optimizing from economic and environmental perspectives, corroborating the results obtained herein.

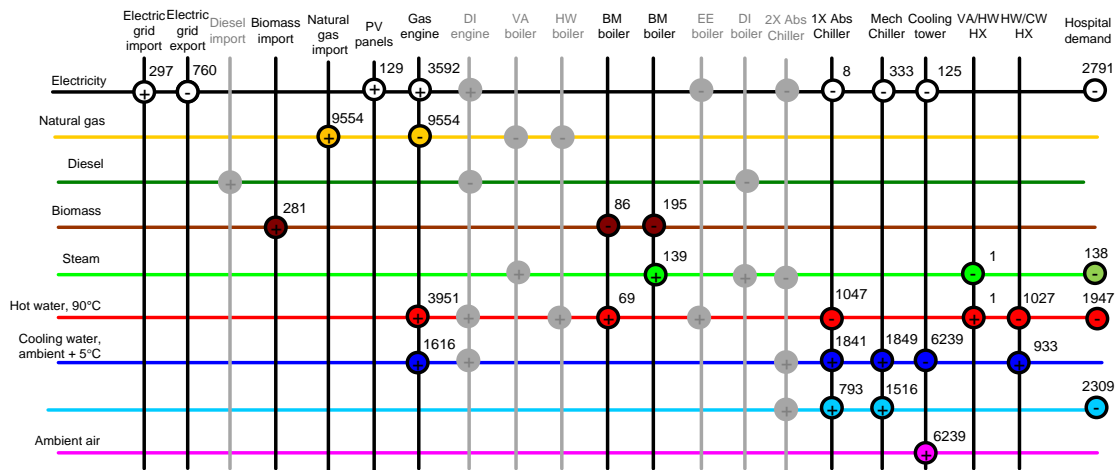


Figure 6.3: Optimal environmental system annual flows (MWh/year).

A progressive change has been observed in recent years: consumers, and society in general, are starting to evolve towards a more environmentally-friendly conscience. This conscience, along with restrictions on the emissions of environmental impacts, have in turn changed how optimal solutions are obtained. Initially optimal solutions were based exclusively on economic aspects. Nowadays, environmental aspects are beginning to be introduced in optimizations, either as a main objective or as part of the objective (which could include energy efficiency or economic terms).

This manuscript explained the incorporation of environmental information in an optimization model for the energy supply of a hospital located in Northeast Brazil. The Life Cycle Assessment methodology was applied for the quantification of environmental loads, expressed by the emissions of CO<sub>2</sub>-eq (IPCC methodology). Environmental data was introduced into the linear programming model, which determined the equipment to be installed and how to operate each technology, in order to satisfy the energy demands of the hospital. The optimal solution also provided all energy, economic, and environmental flows.

The environmental optimal solution suggested that trigeneration is the best option to minimize the environmental loads produced by the energy supply system. Natural gas was imported from the grid to drive the gas engine, which produced hot water and electricity to meet the energy requirements of the hospital. PV panels produced electricity, and biomass was imported for hot water and steam boilers. A single-effect absorption chiller utilized part of the cogenerated heat to produce coolth. Mechanical chillers helped



with the production of coolth also. This optimal solution took advantage of the electricity exports to achieve higher rates of avoided emissions, and realize environmental benefits to lower the overall emissions of the system.

The optimization carried out herein was based on the emission on greenhouse gases (IPCC, 2014). Future works could include the consideration of a different, perhaps more global, impact assessment method for the calculation of environmental impacts. This would likely provide a different result and help verify the effect of utilizing a more wider perspective in the optimization. Also, sensitivity analyses could verify whether the configuration varies when different electricity mixes are applied (different regions present different mixes). The high emissions associated with the purchase of electricity could have a considerable effect on the configuration of the system, as the municipality of João Pessoa counts with the largest thermal plant in the world (oil-based engines).

O texto deste artigo difere ligeiramente da versão apresentada no “*Global Conference on Global Warming*”, devido às observações e sugestões apresentadas pela banca examinadora.

## 6.5 References

- Araújo, M. M. D. 2004. Methodological contribution for the exergetic diagnosis of thermal and electric systems - study case at the Lauro Wanderley University Hospital.MSc.dissertation, Department of Mechanical Engineering, Federal University of Paraíba, João Pessoa, Brazil. (In Portuguese)
- Baumann, H. and A. M. Tillmann. 2004. The hitch hiker’s guide to LCA. An orientation in life cycle assessment methodology and application. Gazelle Book Services.
- Brasil, ANEEL. Resolution N° 482, of April, 17, 2012.Establishes the general conditions for the access of distributed micro- and mini- generation to the electricity distribution system, electricity compensation system, and other matters. Retrieved August 04, 2014, from <http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>. (In Portuguese)
- Carvalho, M., L. M. Serra and M. A. Lozano 2011. Optimal synthesis of trigeneration systems subject to environmental constraints. *Energy*36: 3779-3790.

Carvalho, M. and D. L. Millar. 2012. Concept development of Optimal Mine Site Energy Supply. *Energies* 5: 4726-4745.

Carvalho, M., A. Romero, D. L. Millar. 2014. Biomass and thermal solar energy in the synthesis and optimization of a polygeneration system. *Proceedings of the V Brazilian Solar Energy Conference*. Recife, 2014.

CLIMATICUS 4.2. Climatic database. Project strategies for 58 Brazilian cities. INMET1961-1990 database. Beta version. Faculty of Architecture and Urbanization, University of São Paulo, Technology department, Laboratory of environmental comfort and energy efficiency, 2005. Retrieved November 29, 2013, from [www.usp.br/fau/pesquisa/laboratorios/labaut/conforto/Climaticus\\_4\\_2.xls](http://www.usp.br/fau/pesquisa/laboratorios/labaut/conforto/Climaticus_4_2.xls) (In Portuguese)

EcoInvent database. Available at: <http://www.ecoinvent.ch>. Accessed on 25 mar 2015.

Erbs, D.G., S. A. Klein and W. A. Beckman. 1983. Estimation of degree-days and ambient temperature bin data from monthly-average temperatures, *ASHARE Journal* 25: 60-65.

Guinee, J.B. (ed) *et al.* 2001. Life Cycle Assessment – An operational guide to the ISO standards. Available at <http://media.leidenuniv.nl/legacy/new-dutch-lca-guide-part-1.pdf>.

IPCC. 2014. 2013 Revised Supplementary Methods and Good Practice Guidance Arising from the Kyoto Protocol. Available at: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/kpsg/>. Accessed on 25 mar 2015.

ISO 14040. Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework. International Organization for Standardization (ISO), Geneva, 2006.

ISO 14044. Environmental management - Life cycle assessment - Requirements and guidelines. International Organization for Standardization (ISO), Geneva, 2006.

Kyocera. Kyocera Brasil. Retrieved July 30, 2014, from <http://www.kyocera.com.br/>

Lingo 14.0. Lindo systems. Available at: <http://www.lindo.com>. Access on 27 mar 2015.

Nepote, M. H. A., I. U. Monteiro and E. Hardy. 2009. Association between operational indices and occupation rates of a general surgery center. *Latino-Am. Enfermagem* [online] Journal 17. (In Portuguese)

ONS - Brazilian National Electric System Operator. 2014. Daily Operation Bulletin. <[http://www.ons.org.br/resultados\\_operacao/ipdo\\_new.aspx](http://www.ons.org.br/resultados_operacao/ipdo_new.aspx)>. access on 27 mar 2015.

PBGÁS – Companhia Paraibana de Gás. Tariffs. Retrieved December 24, 2013, from [http://www.pbgas.com.br/?page\\_id=1477](http://www.pbgas.com.br/?page_id=1477) (In Portuguese)

PréConsultants.SimaPro software. Available at: <<http://www.simapro.nl>>. Access on 27 mar 2015.

Ren, H., W. Zhou, K.Nakagami, W. Gao and W. Wu. 2010. Multi-objective optimization for the operation of distributed energy systems considering economic and environmental aspects. *Applied Energy* 87: 3642–3651

Saner, D., C. Vadenbo, B. Steubing and S.Hellweg. 2014. Regionalized LCA-based optimization of building energy supply: method and case study for a Swiss municipality. *Environ Sci Technol* 48: 7651-9.

Udo de Haes, H.A. (ed.). *Life-cycle impact assessment: Striving towards best practice*. Published by the Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC). Pensacola, USA.

WEC – World Energy Council. 2004. Comparison of energy systems using life cycle assessment. Available at <<http://www.worldenergy.org/documents/lca2.pdf>>.

You, F. 2012. *Multiobjective Optimization of Energy-Environmental Systems*. 2012 CAPD Annual Meeting, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, PA.

### Conclusões

No que se refere à Geração Distribuída (GD), o Brasil dispõe atualmente de uma legislação de fácil compreensão e que consegue abranger os aspectos legais, administrativos e técnicos de forma bastante completa. Se comparada à legislação espanhola, onde a GD já está consolidada há mais tempo, e, especificamente para a microgeração e minigeração distribuída, apresentamos uma norma mais madura e eficaz.

O presente trabalho verificou a aplicabilidade da utilização da Energia Solar Fotovoltaica para minigeração distribuída de energia em uma superestrutura de poligeração de um hospital paraibano. Nos resultados apresentados no artigo 1 (capítulo 3) ficou observado que o alto custo de implantação do sistema fotovoltaico ainda não torna essa opção economicamente atrativa.

Os resultados apresentados nesse artigo sinalizaram ainda a possibilidade da utilização da biomassa para geração de energia e aquecimento, uma vez que o valor do MWh da biomassa considerada foi inferior ao dos demais recursos utilizados no sistema de poligeração. Na realização da análise de sensibilidade e resiliência desses resultados, foi prevista a inserção de um gerador a biomassa, para minigeração distribuída. Os novos resultados também apontaram pela não atratividade da utilização desse recurso.

Na etapa seguinte, decidiu-se estudar, de forma mais aprofundada, o tipo de biomassa que melhor se adequava à utilização do hospital e, com dados mais reais de custos de implantação e operação para a região, definiu-se, entre os três tipos analisados, o mais viável a ser utilizado na superestrutura para atendimento as demandas de água quente e vapor, por meio de caldeiras.

Por último, e de maneira complementar, foram avaliados, por meio da Análise de Ciclo de Vida (ACV), os impactos ambientais associados aos recursos e equipamentos presentes na superestrutura de poligeração. Ainda que de maneira tímida, o Brasil já começa a acompanhar a tendência mundial de redução de emissões e não somente de

custos. Os resultados foram apresentados no artigo 4 (capítulo 6), que serviu como ponto de partida para o artigo 5 (capítulo 7), que otimizou o sistema de fornecimento de energia sob um ponto de vista ambiental, minimizando as emissões anuais.

A Tabela 7.1 consolida os resultados das otimizações apresentadas nessa dissertação, de modo que nos permite concluir principalmente:

- 1) A solução de ótimo econômico (mínimo custo anual) sugeriu a utilização da biomassa como recurso nas caldeiras para produção de água quente e vapor, quando 200 painéis fotovoltaicos estão disponíveis para geração de energia. Isto deve-se, principalmente ao fato de que o custo da biomassa considerada é inferior ao dos demais recursos disponíveis para suprimento energético na superestrutura. Comparado a um sistema convencional, a otimização possui custo anual 10,99% inferior;
- 2) Quando a otimização é livre (sem restrições à instalação de equipamentos), a instalação de painéis fotovoltaicos não é atrativa, uma vez que o seu alto custo de implantação e a sua inexpressiva produção, diante da demanda do hospital, não viabilizam a sua utilização;
- 3) A utilização da biomassa para geração de energia também não foi uma opção atrativa desde um ponto de vista econômico, considerando, além do alto custo de implantação do gerador, a eficiência do mesmo, que é baixa;
- 4) A solução ambiental otimizada (mínima emissão anual de CO<sub>2</sub>-eq) sugeriu a trigeração para minimizar os impactos ambientais produzidos pelo sistema de abastecimento de energia. O gás natural foi importado da rede para ser utilizado na produção de eletricidade e água quente, podendo satisfazer assim as principais necessidades energéticas do hospital. Foram instalados painéis fotovoltaicos para produção de eletricidade e a biomassa para a produção de água quente e vapor pelas caldeiras. Uma máquina de absorção simples-efeito aproveita o calor produzido por cogeração para produzir água para refrigeração. A utilização de chillers mecânicos também complementou a produção de água para refrigeração. Esta solução ótima aproveitou as exportações de eletricidade para evitar taxas mais elevadas de emissões e ainda perceber os benefícios ambientais para reduzir as emissões globais do sistema.

Tabela 7.1: Resultados das otimizações econômica e ambiental

Composição do Sistema	Ótimo Econômico			Ótimo Ambiental
	Sistema Convencional	Solar Fotovoltaico (Artigo 2)	Biomassa para Geração (Artigo 2)	Solar Fotovoltaico (Artigo 5)
Gerador a Gás	0 (0 MW)	0 (0 MW)	0 (0 MW)	1 (0.41 MW)
Gerador a Diesel	0 (0 MW)	0 (0 MW)	0 (0 MW)	0 (0 MW)
Gerador a Biomassa	0 (0 MW)	0 (0 MW)	0 (0 MW)	0 (0 MW)
Caldeira- vapor a Gás Natural (GN)	1 (0.300 MW)	0 (0 MW)	0 (0 MW)	0 (0 MW)
Caldeira-vapor a Biomassa (BM)	0 (0 MW)	1 (0.250 MW)	1 (0.250 MW)	1 (0.25 MW)
Caldeira-vapor a Energ. Elétrica (EE)	0 (0 MW)	0 (0 MW)	0 (0 MW)	0 (0 MW)
Trocador de Calor (VA-AQ)	1 (0.400 MW)	1 (0.400 MW)	1 (0.400 MW)	1 (0.40 MW)
Caldeira- água quente (GN)	1 (0.300 MW)	0 (0 MW)	0 (0 MW)	0 (0 MW)
Caldeira – água quente (BM)	0 (0 MW)	2 (0.340 MW)	2 (0.340 MW)	1 (0.17 MW)
Caldeira – água quente (EE)	1 (0.150 MW)	1 (0.150 MW)	1 (0.150 MW)	0 (0 MW)
Trocador de Calor (AQ-AR)	0 (0 MW)	0 (0 MW)	0 (0 MW)	1 (0.40 MW)
Máquina de Absorção Duplo Efeito	0 (0 MW)	0 (0 MW)	0 (0 MW)	0 (0 MW)
Máquina de Abs. Simples Efeito	0 (0 MW)	0 (0 MW)	0 (0 MW)	1 (0.49 MW)
Chiller Mecânico	3 (0.810 MW)	3 (0.810 MW)	3 (0.81 MW)	3 (0.81 MW)
Torre de Resfriamento	1 (1.000 MW)	1 (1.000 MW)	1 (1.000 MW)	2 (2.00 MW)
Painéis Fotovoltaicos (unidades)	-	200	-	200
EE Importada (MWh/ano)	4281	3244	3373	297
EE Produzida Painéis FV (MWh/ano)	--	129	--	129
Créditos de Eletricidade (MWh/ano)	--	--	--	760
Gás Natural Importado (MWh/ano)	1528	--	--	9554
Diesel Importado (MWh/ano)	--	--	--	--
Biomassa Importada (MWh/ano)	--	2663	2663	281
Investimento Inicial em equipamentos	US\$ 374,670	US\$ 587,089	US\$ 410,918	US\$ 1,022,892
Custo EE importada (US\$/ano)	233,979	180,489	187,155	15,342
Credito EE exportada (US\$/ano)	--	--	--	43,488
Custo Gás importado (US\$/ano)	73,335	--	--	458,576
Custo Diesel importado (US\$/ano)	--	--	--	--
Custo Biomassa importada (US\$/ano)	--	35,150	55,355	3708
Custo Operação e Manut. (US\$/ano)	16,716	21,813	21,813	53,519
Custo Equipamento (US\$/ano)	48,707	76,322	53,419	132,976
<b>Custo total (US\$/ano)</b>	<b>372,758</b>	<b>331,774</b>	<b>317,776</b>	<b>620,633</b>
Emissões iniciais (equip.) kg CO <sub>2</sub> -eq	2,291,100	3,851,100	--	1,954,903
Emissões EE importada (kg CO <sub>2</sub> -eq/ano)	2,482,917	1,881,711	--	172,222
Emissões EE exportada (kg CO <sub>2</sub> -eq/ano)	--	--	--	441,039
Emissões GN importado (kg CO <sub>2</sub> -eq/ano)	391,230	--	--	2,445,736
Emissões Diesel importado (kg CO <sub>2</sub> -eq/ano)	--	--	--	--
Emissões BM importada (kg CO <sub>2</sub> -eq/ano)	--	391,448	--	41,296
Emissões anuais equipamentos (kg CO <sub>2</sub> -eq/ano)	674,291	385,110	--	195,490
<b>Emissões totais (kg CO<sub>2</sub>-eq/ano)</b>	<b>3,548,438</b>	<b>2,658,269</b>	<b>--</b>	<b>2,557,232</b>

Segundo o Ministério da Saúde (BRASIL, 2012), em 2009, o Brasil tinha 2,26 leitos hospitalares por mil habitantes, o que totaliza 432.790 leitos disponíveis para a população brasileira no referido ano. Se a metodologia apresentada no artigo 3, onde foi implementada uma otimização econômica para um hospital de 420 leitos, fosse extrapolada, considerando a quantidade de leitos no Brasil, tendo com referência o ano de 2009, percebe-se que:

- 1) O benefício econômico seria da ordem de US\$ 42 milhões, já que a configuração ótima, com a utilização da energia solar fotovoltaica, apresenta um custo anual total por leito de US\$ 789,94;
- 2) Quanto a energia elétrica importada da rede, a redução seria de aproximadamente 1,07 TWh/ano, com a configuração de ótimo econômico, e de aproximadamente 4,10 TWh/ano, com a configuração de ótimo ambiental;

Nesse contexto, percebe-se ainda que, apesar do avanço considerável na legislação para incentivo à utilização dos recursos energéticos renováveis não convencionais, o custo de implantação desses sistemas ainda é alto. Esse foi um dos principais obstáculos à GD, visualizados neste trabalho.

A disseminação da GD, não só na Paraíba, mas em todo o Brasil, depende de uma série de fatores, que dentre os principais, destacam-se: a necessidade de ações motivacionais do governo, com a implantação de políticas de incentivo ao financiamento de equipamentos que compõem a GD, definições uniformes e equilibradas quanto à tributação da energia gerada e análise detalhada do método de compensação utilizado, cujo objetivo é o de corrigir possíveis distorções econômicas entre a unidade geradora/consumidora e a empresa distribuidora de energia.

Considerando o atual cenário da política energética adotada no Brasil, com o implemento legal das bandeiras tarifárias e o aumento gradativo do custo da energia elétrica, devido principalmente a condições ambientais, sugere-se como trabalho futuro uma análise multicritério para tomada de decisão, em busca da solução de equilíbrio, diante de dois objetivos aparentemente divergentes, a saber: mínimo custo e mínimo impacto ambiental.

## Referências Bibliográficas

BARBOSA-JUNIOR, A. F *et al.* **Conceitos e Aplicação de ACV no Brasil.** In: XXVII Encontro Nacional de Engenharia de Produção –ENEGEP –Foz do Iguaçu –PR –2007. 9p.

BIEGLER L.T, GROSSMAN I.E. Retrospective on optimization. Computers and Chemical Engineering. Vol. 28, 2004 pp. 1169-1218.

BRASIL. ANEEL Atlas de energia elétrica do Brasil / Agência Nacional de Energia Elétrica. 3. Ed – Brasília : Aneel, 2008. 236 p. ISBN: 978-85-87491-10-7.

BRASIL. ANEEL. Banco de Informações de Geração. Disponível em <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/AgenteGeracao/ListaAgentes.asp>. Acesso em 16/08/2015.

BRASIL. ANEEL. Decreto 5163, de 30 de Julho de 2004. Disponível em <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2004-2006/2004/decreto/d5163.HTM](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2004-2006/2004/decreto/d5163.HTM)>. Acesso em 13/07/2015.

BRASIL. ANEEL. Nota Técnica nº 0017/2015-SRD/ANEEL. Disponível em [http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2015/026/documento/nota\\_tecnica\\_0017\\_2015\\_srd](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2015/026/documento/nota_tecnica_0017_2015_srd). Acesso em 30/06/2015.

BRASIL. ANEEL. Resolução Normativa Nº 482, de 17 de Abril de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf> >. Acesso em 10/11/2014.

BRASIL. ANEEL. Resolução Normativa Nº 414, de 09 de Setembro de 2010. Estabelece as Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica. Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2010414.pdf>>. Acesso em 10/11/2014.

BRASIL. EPE. BEN 2015. Disponível em <[https://ben.epe.gov.br/downloads/Síntese do Relatório Final\\_2015\\_Web.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Síntese%20do%20Relatório%20Final_2015_Web.pdf)>. Acesso em 11/07/2015.

BRASIL. Lei 10438, de 26 de Abril de 2002. Disponível em <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/2002/L10438.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/2002/L10438.htm)>. Acesso em 13/07/2015.



BRASIL. Ministério da Saúde. Indicadores e Dados Básicos - Brasil – 2012-IDB-2012. Disponível em <<http://tabnet.datasus.gov.br/cgi/idb2012/matriz.htm#cober>>. Acesso em 21/08/2015.

CARVALHO, M. Thermo-economic and environmental analyses in the synthesis of polygeneration systems for the residential-commercial sector, 2011. Tese de doutorado do Department of Mechanical Engineering da University of Zaragoza. Disponível em: <<http://zaguan.unizar.es/record/5744/files/TESIS-2011-025.pdf/>>. Acesso em 18/08/2015.

EIONET - European Topic Centre on Sustainable Consumption and Production. 2003. Life-cycle assessment and life-cycle thinking in resource and waste management. Disponível em: <<http://scp.eionet.europa.eu/themes/lca>>. Acesso em 11.08.2015.

FERREIRA, J. V. R. Análise de Ciclo de Vida dos Produtos. IPV – Instituto Politécnico de Viseu – Campus Politécnico – 3504-510 – VISEU – Portugal – 2004. 80p.

FRANGOPOULOS, C.A. 2009. Exergy, Energy System Analysis and Optimization. Vol. II - Optimization Methods for Energy Systems. Disponível em: <<http://scp.eionet.europa.eu/themes/lca>>. Acesso em 11.08.2015.

GROSSMAN I.E, Caballero J.A, & Yeomans H. (2000) Advances in mathematical programming for the synthesis of process systems. **Latin American Applied Research**. Vol.30 14 pp. 263–284.

GROSSMAN I.E (2012). Advances in mathematical programming models for enterprise-wide optimization. **Computers & Chemical Engineering**. Vol. 47 pp 2-18.

IP (2003). Integer Linear Programming. Disponível em <<http://www.doc.ic.ac.uk/~br/berc/integerprog.pdf>>. Acesso em 18/08/2015.

HINZ, R. T. P, VALENTINA L. V. D., FRANCO, A. C. Sustentabilidade ambiental das organizações através da produção mais limpa ou pela Avaliação do Ciclo de Vida. Disponível em: <[http://revistas.unisinos.br/index.php/estudos\\_tecnologicos/article/view/6078](http://revistas.unisinos.br/index.php/estudos_tecnologicos/article/view/6078)>. Acesso em: 09 de novembro de 2014.

LOZANO, M. A *et al.* Structure optimization of energy supply systems in tertiary sector buildings. **Energy and Buildings**, 2009, n. 10, 1063-1075 p. 41v.

NBR ISO 14.040. Gestão ambiental – Avaliação do ciclo de vida – Princípios e estrutura. Disponível em: <<http://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=40200>>. Acesso em 15/04/2015.

NOGUEIRA, M. F. M.; RENDEIRO, G. Caracterização Energética da Biomassa Vegetal. BARRETO, E. J. F. (Coord). In: **Combustão e Gaseificação da Biomassa Sólida: Soluções Energéticas para a Amazônia**. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008. p. 52-63.

PEREIRA, E. *et al.* Atlas Brasileiro de Energia Solar, São José dos Campos-SP, INPE, 2006. 60 p. Disponível em: <[http://www.ccst.inpe.br/wp-content/themes/ccst-2.0/pdf/atlas\\_solar-reduced.pdf](http://www.ccst.inpe.br/wp-content/themes/ccst-2.0/pdf/atlas_solar-reduced.pdf)> Acesso em 15.11.2014.

Projeto EnerBuiLCA. 2012. Manual explicativo da Avaliação de Ciclo de Vida aplicada ao setor da construção. Disponível em: <<http://www.interreg-sudoe.eu/contenidodinamico/libreria-ficheros/EFDEB073-3C69-3AC9-41D4-0603A70E0709.pdf>>. Acesso em 13 abr 2015.

ROMERO, A., CARVALHO, M., MILLAR, D. L. Application of a polygeneration optimization technique for a hospital in Northern Ontario. **Transactions of the Canadian Society of Mechanical Engineering**, vol. 1, 2014a.

ROMERO, A., CARVALHO, M., MILLAR, D. L. **Biomassa e energia solar térmica na síntese e otimização de um sistema de poligeração**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 5., 2014, Recife. *Anais*. Recife: ABES, 2014b.

RUBIO-MAYA, C., UCHE, J., MARTINEZ, A. Sequential optimization of a polygeneration plant. **Energy Conversion and Management**, v. 52, n. 8–9, p. 2861–2869, 2011.

SHANG, Z., KOKOSSIS, A. A systematic approach to the synthesis and design of flexible utility systems. **Chemical Engineering Science**, v. 60, p. 4431–4451, 2005.

SERRA, L.M. *et al.* Polygeneration and efficient use of natural resources. **Energy**, v. 34, p. 575–586, 2009.

SEVERINO, M. M., CAMARGO, I. M.T; OLIVEIRA, M. A. G. Geração distribuída: discussão conceitual e nova definição. *Revista Brasileira de Energia*, v.14, n.1, p.47-69, 2008. Disponível em:<<http://www.sbpe.org.br/rbe/revista/26/>>. Acesso em: 22 jul. 2014.

TIBA, C. *et al.* Atlas Solarimétrico do Brasil : banco de dados solarimétricos. Recife: Ed. Universitária da UFPE, 2000. 111 p. Disponível em: <[http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Atlas\\_Solarimetrico\\_do\\_Brasil\\_2000.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Atlas_Solarimetrico_do_Brasil_2000.pdf)> Acesso em 15.11.2014.

VILLALVA, M., GAZOLI, J. Energia Solar Fotovoltaica – Conceitos e aplicações. São Paulo: Editora Érica, 2013.

YANG, C. Optimal design and operation of energy polygeneration systems, 2013. Tese de doutorado, Instituto de Tecnologia de Massachussets. Cambridge, Massachussets (EUA). Disponível em: <http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/79192>. Acesso em 07/08/2014.

ZIHER, D., POREDOS, A. Economics of a trigeneration system in a hospital. *Applied Thermal Engineering*, 2006, n. 7, v. 26 680–687 p.

## Apêndice I

# Artigo 5 - Modelo Regulatório da Microgeração e Minigeração Distribuída no Brasil: Uma Análise com Base no Direito Comparado

**Danielle Bandeira de Mello Delgado – [danielle.delgado@cear.ufpb.br](mailto:danielle.delgado@cear.ufpb.br)**

Universidade Federal da Paraíba, Programa de Pós Graduação em Energias Renováveis, Centro de Energias Alternativas e Renováveis. Caixa Postal 5115, Cidade Universitária, João Pessoa - PB, 58059-970. Brasil. +55 83 3216 7268

**Monica Carvalho – [monica@cear.ufpb.br](mailto:monica@cear.ufpb.br)**

Universidade Federal da Paraíba, Programa de Pós Graduação em Energias Renováveis, Centro de Energias Alternativas e Renováveis. Caixa Postal 5115, Cidade Universitária, João Pessoa - PB, 58059-970. Brasil. +55 83 3216 7268

### RESUMO

O estudo de direito comparado de instrumentos legais que regulam situações análogas é importante, pois permite analisar a eficácia da norma em um contexto global e temporal. Esse trabalho cria uma metodologia de comparação para avaliar dois instrumentos normativos, que tratam da Geração Distribuída (GD) para o autoconsumo de energia elétrica, sendo a legislação brasileira comparada à normativa da Espanha. Percebe-se nessa análise que a Resolução n.º 482 da ANEEL é didática, concentrada e aborda praticamente todos os requisitos administrativos, econômicos e técnicos em seu escopo. Por outro lado, na Espanha, apesar da GD está praticamente consolidada, no que se refere ao autoconsumo, a legislação é recente e existem inúmeras situações que ainda carecem de regulamentação.

**Palavras Chave:** Geração Distribuída, autoconsumo, direito comparado.

### I.1 Introdução

No universo da Ciência Jurídica do Direito, uma atividade bastante enriquecedora é o estudo comparativo entre sistemas jurídicos, o chamado Direito Comparado. Esse estudo tem uma importância fundamental nos mais diversos ramos do Direito, pois fornece elementos para uma investigação científica mais apurada, além de uma melhor

compreensão do modelo adotado, levando o comparador a novas descobertas e a proposição de melhorias.

Serrano (2006, p. 34) aponta como primeira grande utilidade das análises de direito comparado, a possibilidade de indicar as normas jurídicas afins nas legislações nacionais e estrangeiras, com o objetivo de confrontá-las para determinar as analogias e diferenças existentes entre sistemas e institutos, bem como avaliar o desenvolvimento e aproximação das legislações ou instituições jurídicas de diversos países, formando assim o novo Direito Positivo Contemporâneo.

A Geração Distribuída (GD) é a unidade de produção de energia elétrica realizada junto ou próxima do centro de consumo, cujas principais vantagens são: a redução nos investimentos de transmissão e das perdas na distribuição. Considera-se GD aquela que: (a) está conectada à rede de distribuição; (b) está conectada ao lado de um consumidor conectado a algum ponto do sistema elétrico; (c) supre cargas elétricas de uma instalação eletricamente isolada; ou (d) está conectada diretamente à rede de transmissão, desde que, neste caso, ela não possa ser considerada caso pertencente à geração centralizada (SEVERINO, 2008).

O grande marco regulatório da GD no Brasil foi a publicação da Resolução Normativa nº482/2012, pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), em 17 de abril de 2012, cujo conteúdo estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica e define o sistema de compensação de energia elétrica (BRASIL, 2012), e é nesse dispositivo legal que surgem os conceitos de microgeração e minigeração distribuída.

A microgeração é definida como a central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 100 kW e que utilize fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras; e a minigeração, definida como a central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 100 kW e menor ou igual a 1 MW, que utilizem as mesmas fontes indicadas anteriormente. A Figura I.1 mostra a evolução temporal da microgeração e minigeração Distribuída no Brasil, em número acumulado de conexões.

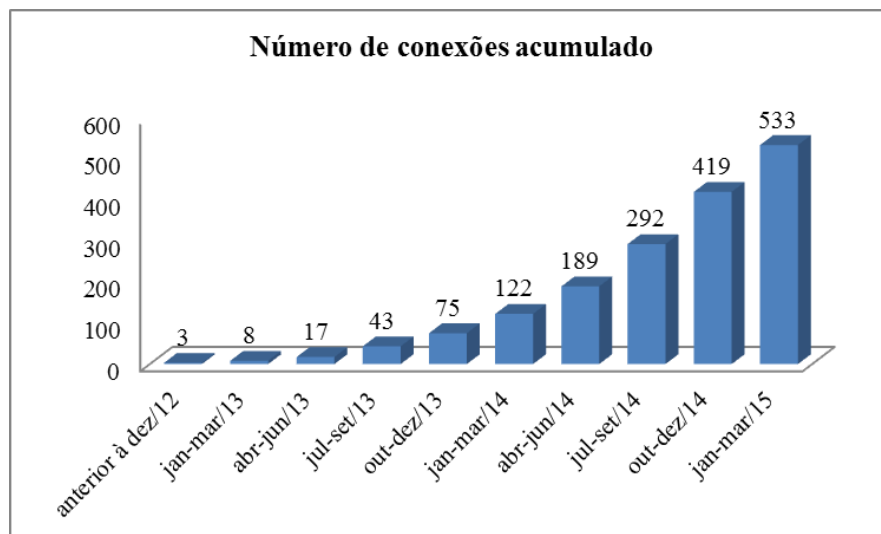


Figura I.1: Evolução da Microgeração e Minigeração Distribuída no Brasil (BRASIL, 2015)

Nesse contexto, este artigo objetiva conhecer, compreender e comparar o instituto do modelo regulatório brasileiro com o da Espanha, onde a GD está mais consolidada, sendo uma ferramenta útil para a compreensão e tentativa de aperfeiçoamento do modelo regulatório brasileiro.

A primeira parte destina-se, de forma introdutória, a apresentação de aspectos relevantes da metodologia comparativa utilizada. Na segunda parte será apresentado um quadro comparativo com os principais artigos analisados, seguido da interpretação jurídica dos mesmos, destacando suas principais diferenças e semelhanças. Nas considerações finais será feita uma análise crítica do estudo comparativo realizado, pontuando as observações mais relevantes.

## I.2 Metodologia Comparativa

Não existe na doutrina uma metodologia específica para a realização do estudo de direito comparado. A análise dos modelos regulatórios aqui proposta é inovadora principalmente pela inexistência de uma metodologia pré-estabelecida, pela ausência de pesquisas anteriores sobre o tema, além da insuficiência de dados.

De certo modo, pode-se dizer que comparar é impor significados a objetos e interpretar fenômenos. Nenhum objeto ou processo, abstratamente, tem significado, mas obtém a sua interpretação em face de alguns pontos de referência (CASTRO, 2011).

A abordagem do estudo aqui proposto concentra-se apenas na geração distribuída para o autoconsumo, ou seja, no que a normativa brasileira denomina de microgeração/minigeração distribuída.

Depois de realizada uma pesquisa bibliográfica, o modelo regulatório escolhido para o estudo comparativo foi o espanhol, e os fatores determinantes para a escolha foram principalmente: a disponibilidade de acesso às normas do setor elétrico e o melhor nível de apresentação e compreensão das mesmas.

A análise comparativa dos modelos regulatórios para microgeração e minigeração distribuída foi desenvolvida tendo como base a estruturação da Resolução Normativa nº482/2012, atualmente em vigor no Brasil, e foram comparados com a lei do setor elétrico espanhola, sob os seguintes aspectos legais (Figura I.2):

- a) Objeto: identifica o escopo e a abrangência das normas que estão sendo comparadas;
- b) Conceitos: apresenta os principais conceitos necessários para a compreensão dos institutos analisados;
- c) Conexão ao Sistema Elétrico: distinguir, nos dispositivos legais que estão sendo comparados, a forma de acesso e de conexão ao sistema de distribuição de energia;
- d) Sistema de venda ou compensação de excedentes: comparar, nos dispositivos legais objeto desse estudo, como se desenham as condições econômicas da produção de energia excedente em uma unidade consumidora que tenha instalado um sistema de microgeração ou minigeração distribuída;
- e) Aspectos Contratuais Relevantes: examinar como se dá a formalização da relação jurídica. Na análise comparativa serão abordadas as obrigações técnicas, administrativas e financeiras de cada parte, se existe limite da potência instalada previsto e como se configura o esquema de medição de energia ativa;

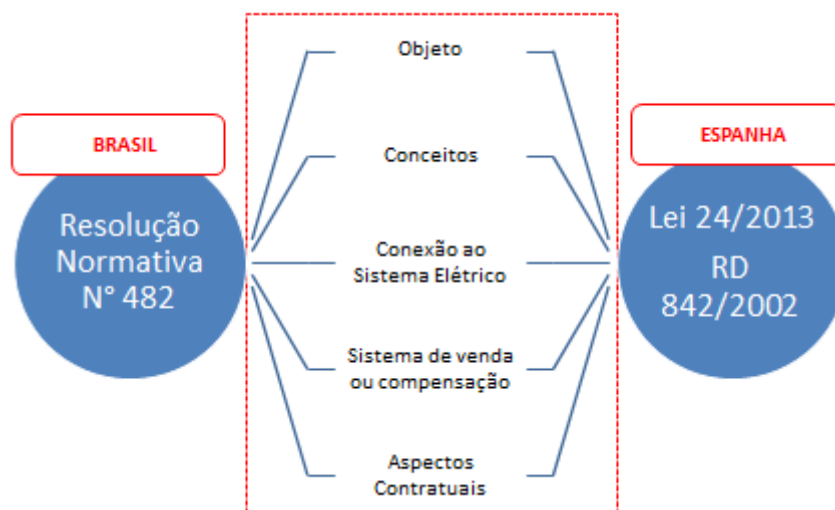


Figura I.2: Metodologia comparativa entre os dispositivos legais

### I.3 Análise Comparativa

De acordo com a metodologia estabelecida anteriormente, a análise comparativa teve como base os requisitos expostos na Resolução Normativa nº482/2012 da ANEEL. Comparou-se o dispositivo legal brasileiro com o espanhol, sob os aspectos abordados nos tópicos a seguir.

#### I.3.1 Objeto

A força normativa dos dispositivos legais, tanto do Brasil, quanto da Espanha é a mesma, ambas as normas são materiais e têm força de lei, ou seja, decorrem de um processo legislativo. Na Espanha, os decretos leis são editados em caso de extraordinária e urgente necessidade do governo e uma vez publicados no Boletim Oficial do Estado (BOE), e conforme previsto no artigo 86 da constituição espanhola, esses decretos leis são incorporados ao ordenamento jurídico e o conselho de Ministros tem o prazo de 30 dias para validá-lo ou derrogá-lo (ESPANHA, 1978).

Ao contrário da resolução brasileira, que trata especificamente do assunto em um mesmo documento, observou-se que na legislação espanhola, a matéria ainda não foi totalmente regulamentada, sendo esparsa, e o assunto tratado em mais de um dispositivo legal. A analogia foi utilizada fortemente como fonte no direito espanhol, além da interpretação sistemática desses dispositivos legais. A Tabela I.1 identifica esses institutos, apresentando o seu objeto de regulamentação.

Tabela I.1: Análise Comparativa do Objeto das Normas Jurídicas.

<b>Brasil</b>	
<b>Dispositivo Legal</b>	Resolução Normativa nº482/2012 de 17 de abril de 2012.
<b>Objeto</b>	Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica e dá outras providências (BRASIL, 2012)

<b>Espanha</b>	
<b>Dispositivo Legal</b>	Lei 24/2013 do Setor Elétrico, de 26 de dezembro de 2013.
<b>Objeto</b>	Estabelecer a regulação do setor elétrico com a finalidade de garantir o fornecimento de energia elétrica e de adequá-lo as necessidades dos consumidores em termos de segurança, qualidade, eficiência, objetividade, transparência e mínimo custo. São atividades destinadas ao fornecimento de energia elétrica: geração, transporte, distribuição, serviços de recarga energética, comercialização e trocas intracomunitárias e internacionais, assim como a gestão económica e técnica do sistema elétrico (Traduzido de ESPANHA, 2013).

Percebe-se, em uma primeira leitura, que a regulamentação que trata da geração distribuída para autoconsumo no país europeu é mais recente que a normativa brasileira.

Na verdade, a GD na Espanha está bastante consolidada e os primeiros mecanismos regulatórios apareceram nos anos 90 (BRASIL, 2009), mas estes tratavam apenas da geração não centralizada para produção e comercialização de energia e não especificamente para o autoconsumo.

Os avanços nas tecnologias associadas à utilização de fontes de energia renováveis não convencionais, principalmente a solar e a eólica, e a crise financeira que afetou o setor elétrico europeu desencadeou o desenvolvimento de novas formas de produção, sendo a autoprodução, uma delas. Entende-se por autoprodução de energia aquela gerada para satisfazer a totalidade ou parte da demanda do consumidor, termo este também conhecido como autoconsumo.

O art. 9 da Lei do Setor Elétrico espanhol de 2013 (ESPANHA, 2013) trata do conceito, das modalidades de autoconsumo, da implementação e regulamentação necessária, das condições administrativas e técnicas para a ligação das instalações à rede elétrica e das condições econômicas para verter a energia não consumida para a rede de



distribuição; bem como as obrigações e direitos decorrentes da ligação a esses consumidores e registro obrigatório no Registo Administrativo de Autoconsumo.

A normativa brasileira (BRASIL, 2012) traz em seu escopo as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída de energia elétrica, o sistema de medição e compensação de energia elétrica e as responsabilidades pelos danos ocasionados ao sistema elétrico de potência.

Percebe-se, nesse contexto, que mesmo com o histórico e a maturidade da GD na Espanha, no que se refere ao autoconsumo, ou seja, a produção de energia para o próprio consumo, com previsão de verter a produção da energia excedente para a rede elétrica, a regulação espanhola ainda é incipiente. O Brasil, por sua vez, mesmo apresentando uma normativa um pouco mais antiga e com objeto mais específico, ainda não teve uma forte adesão para geração distribuída.

### I.3.2 Conceitos

A Tabela I.2 apresenta os principais conceitos trazidos pelas normas objeto deste estudo de direito comparado sobre a geração distribuída para o autoconsumo.

Tabela I.2: Análise Comparativa dos Conceitos apresentados nas Normas Jurídicas.

<b>Brasil</b>	
<b>Dispositivo Legal</b>	Resolução Normativa nº482/2012 de 17 de abril de 2012.
<b>Conceitos</b>	<p>Art. 2º - I -microgeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 100 kW e que utilize fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;</p> <p>II - minigeração distribuída: central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 100 kW e menor ou igual a 1 MW para fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras;</p> <p>III - sistema de compensação de energia elétrica: sistema no qual a energia ativa injetada por unidade consumidora com microgeração distribuída ou minigeração distribuída é cedida, por meio de empréstimo gratuito, à distribuidora local e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica ativa dessa mesma unidade consumidora ou de outra unidade consumidora de mesma titularidade da unidade consumidora onde os créditos foram gerados, desde que possua o mesmo Cadastro de Pessoa Física (CPF) ou Cadastro de Pessoa Jurídica (CNPJ) junto ao Ministério da Fazenda. (BRASIL, 2012).</p>

<b>Espanha</b>	
<b>Dispositivo Legal</b>	Lei 24/2013 do Setor Elétrico, de 26 de dezembro de 2013. Real Decreto 842/2002, de 02 de agosto de 2002.
<b>Conceitos</b>	<p>Lei 24/2013 do Setor Elétrico, de 26 de dezembro de 2013:</p> <p>Art. 9 apdo. 1º - Para os efeitos desta lei, se entenderá como autoconsumo o consumo de energía eléctrica proveniente de instalações de geração conectadas ao interior de uma rede de um consumidor ou através de uma linha direta de energía eléctrica associadas a um consumidor.</p> <p>Se distinguem as seguintes modalidades de autoconsumo:</p> <p>a) Modalidades de fornecimento com autoconsumo. Quando se trata de um consumidor que dispõe de uma instalação de geração destinada ao consumo próprio, conectada ao interior da rede de seu ponto de fornecimento e que não foi apurado no registro como unidade de produção. Neste caso existirá um único sujeito dos previstos no artigo 6, que será o sujeito consumidor.</p> <p>b) Modalidades de produção com autoconsumo. Quando se trata de um consumidor asociado a uma instalação de produção devidamente inscrita no registro administrativo de instalações de produção de energía eléctrica conectada ao interior de sua rede. Neste caso</p>

existirão dois sujeitos dos previstos no artigo 6, o sujeito consumidor e o produtor.

c) Modalidades de produção com autoconsumo de um consumidor conectado através de uma linha direta com uma instalação de produção. Quando se trata de um consumidor associado a uma instalação de produção devidamente inscrita no registro no registro administrativo de instalações de produção de energia elétrica a que estivera conectado através de uma linha direta. Neste caso existirão dois sujeitos dos previstos no artigo 6, o sujeito consumidor e o produtor.

d) Qualquer outra modalidade de consumo de energia elétrica proveniente de uma instalação de geração de energia elétrica associada a um consumidor (Traduzido de ESPANHA, 2013)

Real Decreto 842/2002, de 02 de agosto de 2002:

Artigo 2. Campo de Aplicação.

O presente regulamento se aplicará às instalações que distribuam a energia elétrica, às geradoras de eletricidade para consumo próprio e as receptoras, nos seguintes limites de tensões nominais:

a) Corrente alternada: igual ou inferior a 1.000 volts.

b) Corrente contínua: igual ou inferior a 1.500 volts (Traduzido de ESPANHA, 2002).

A Resolução Normativa nº482/2012 (BRASIL, 2012) apresenta as definições de microgeração e minigeração distribuída de forma bastante clara. Identifica-se nitidamente o limite de potência que classifica cada seguimento, qual o tipo de fonte que pode ser regulado pela norma e a previsão de conexão com a rede de distribuição. O mesmo acontece com a definição da compensação de energia elétrica, que ressalta a relação jurídica entre o consumidor com a empresa distribuidora de energia. Essa relação não se caracteriza como uma comercialização de energia elétrica, mas como mútuo (empréstimo gratuito) de energia elétrica. A Agência limitou ainda o alcance do sistema de compensação de energia aos consumidores com mesmo CPF ou CNPJ, de forma a esclarecer que não se tratava de operação como compra e venda de energia (ANEEL, 2015).

Em contrapartida, a legislação espanhola (ESPANHA, 2013) já não é tão esclarecedora. A definição se concentra no fato de que a energia consumida vem de uma instalação de geração que está ligada diretamente ao consumidor. Ou, por outras palavras, o autoconsumo de energia da unidade por uma rede interna e não pela rede de distribuição de energia elétrica. Não se discrimina o tipo de fonte geradora, nem se a energia pode ser vertida para a rede de distribuição, aspectos de bastante relevância quanto ao regime

jurídico aplicável aos consumidores. A utilização de fontes renováveis de energia na geração de energia é regulada por outro instrumento normativo.

O Real Decreto 842/2002 (ESPANHA, 2002), que regulamenta as Instalações Elétricas de Baixa Tensão, traz uma definição adicional, distinguindo as instalações com base na sua ligação à rede pública, sendo: instalações geradoras isoladas, assistidas e interligadas. A primeira não tem ligação à rede pública, enquanto a assistida está ligada, mas não pode funcionar em paralelo, em oposição à interligada que, além de ser ligada, pode trabalhar em paralelo com a rede de distribuição. As instalações interligadas são os objetos de comparação nesse estudo.

### I.3.3 Conexão ao Sistema Elétrico

A análise desse tópico visa comparar como se dá as formas de acesso da unidade consumidora com sistema de geração distribuída de pequeno porte às redes públicas, ao sistema de distribuição de energia elétrica. Pretende-se analisar a formalização desse acesso, prazos e requisitos técnicos (Tabela I.3).

Tabela I.3: Análise Comparativa da Conexão ao Sistema Elétrico das Normas Jurídicas

<b>Brasil</b>	
<b>Dispositivo Legal</b>	Resolução Normativa nº482/2012 de 17 de abril de 2012.
<b>Conexão ao Sistema Elétrico</b>	Art. 3º As distribuidoras deverão adequar seus sistemas comerciais e elaborar ou revisar normas técnicas para tratar do acesso de microgeração e minigeração distribuída, utilizando como referência os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica o Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, as normas técnicas brasileiras e, de forma complementar, as normas internacionais. §1º O prazo para a distribuidora efetuar as alterações de que trata o caput e publicar as referidas normas técnicas em seu endereço eletrônico é de 240 (duzentos e quarenta) dias, contados da publicação desta Resolução. §2º Após o prazo do § 1º, a distribuidora deverá atender às solicitações de acesso para micro geradores e minigeradores distribuídos nos termos da Seção 3.7 do Módulo 3 do PRODIST. (BRASIL, 2012)
<b>Espanha</b>	
<b>Dispositivo Legal</b>	Lei 24/2013 do Setor Elétrico, de 26 de dezembro de 2013.
<b>Conexão ao</b>	Art. 9 apdo. 5º - O Governo estabelecerá as condições administrativas e técnicas para a conexão à rede das instalações com

## Sistema Elétrico

autoconsumo.

O Governo estabelecerá também as condições económicas para que as instalações da modalidade b) de produção com autoconsumo vendam ao sistema a energia não autoconsumida (Traduzido de ESPANHA, 2013).

A norma brasileira (BRASIL, 2012) estabelece um prazo para que as empresas distribuidoras de energia eléctrica adequem as suas normas técnicas para atendimento aos consumidores interessados em instalar sistemas de microgeração ou minigeração distribuída. Essa adequação técnica deve seguir o que está previsto no módulo 3.7 do PRODIST (BRASIL, 2012) – Procedimento de Distribuição, emitido pelo órgão regulamentador e fiscalizador do Setor Elétrico Brasileiro, a ANEEL. A Figura I.3 apresenta o número de conexões, por empresa distribuidora de energia, regulamentadas pela resolução brasileira, até março de 2015.

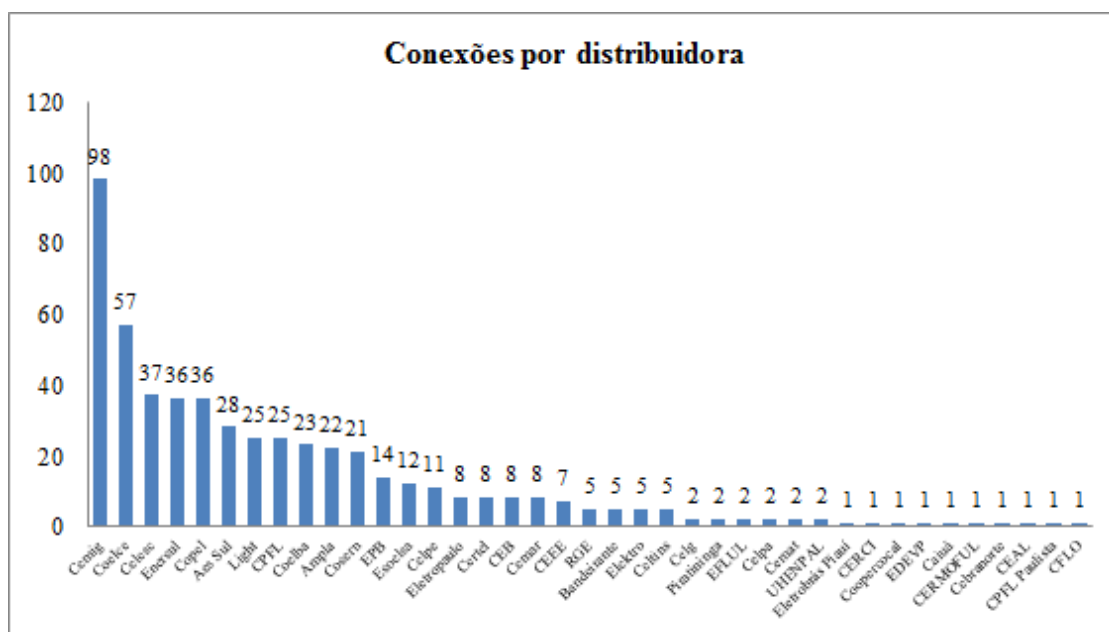


Figura I.3. Número de Conexões por distribuidora de Energia (ANEEL, 2015).

### I.3.3.1 Requisitos Administrativos Estabelecidos no PRODIST

O módulo 3.7 do PRODIST (BRASIL, 2012) estabelece os requisitos de acesso necessários para a formalização junto à empresa distribuidora de energia eléctrica. A Figura I.4 apresenta os requisitos administrativos previstos pela legislação brasileira.

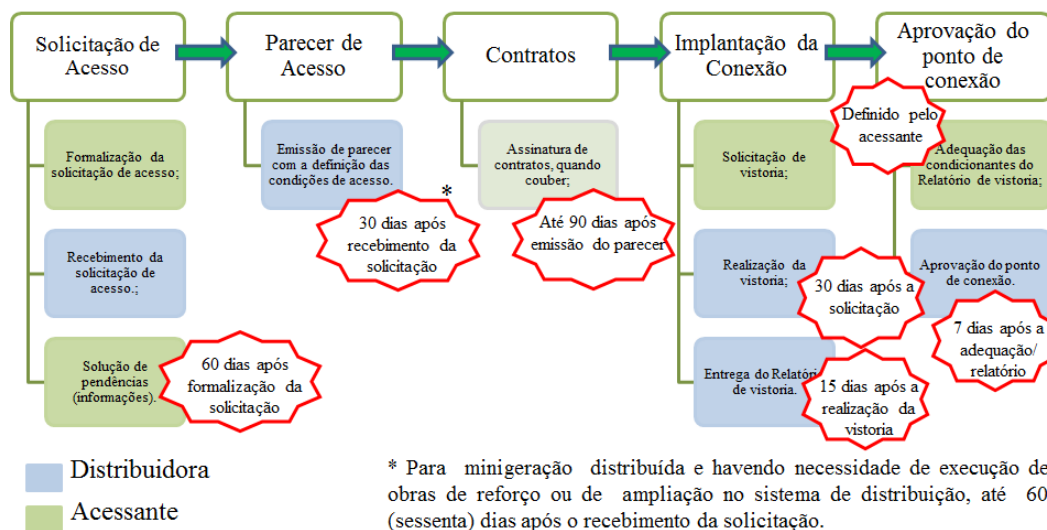


Figura I.4: Procedimento para solicitação de acesso à rede de distribuição da empresa distribuidora.

### I.3.3.2 Requisitos Técnicos

Os requisitos técnicos devem ser normatizados por cada empresa distribuidora de energia, e foram regulamentados de acordo com os parâmetros pré-estabelecidos no módulo 3.7 dos procedimentos de distribuição – PRODIST (BRASIL, 2012). Esses procedimentos são diretrizes orientativas que complementam o escopo previsto na resolução em estudo.

O art. 9 *apdo* 5º da Legislação do Setor Elétrico espanhol (ESPANHA, 2013) dispõe que o governo deverá estabelecer as condições administrativas e técnicas para a conexão a rede das instalações de autoconsumo. Conseqüentemente, todas as instalações que desejarem se conectar a rede de distribuição deve respeitar essas condições administrativas e técnicas estabelecidas pelo governo.

Existe um projeto de real decreto elaborado pelo governo que prevê como se dará as condições de acesso da unidade de autoconsumo à rede elétrica. O mesmo determina que o acesso deva ser solicitado ao gerente da rede de distribuição da área, mesmo que a unidade não verta energia ao sistema a todo o momento. Exige-se a assinatura de um contrato de acesso com a empresa de distribuição e o prazo para compensação previsto é de 12 meses.

Como as condições administrativas e técnicas específicas para as instalações de autoconsumo ainda não foram totalmente regulamentadas pelo governo espanhol, outras

normas são utilizadas como analogia, e para isso, deve distinguir as instalações como: pequenas instalações (potência inferior a 100 kW); e instalações acima de 100 kW, para com isso, poder aplicar os regulamentos previstos na Lei do Setor Elétrico (ESPANHA,2013).

O marco normativo básico que trata da conexão a rede de instalações de produção de energia elétrica de pequena potência é Real Decreto 1699/2011(ESPANHA, 2011), de 18 de novembro, que regula a conexão a rede de instalações de produção de energia elétrica de pequena potência (potência inferior a 100 kW). As condições administrativas e técnicas que as instalações de potência superior a 100 kW devem cumprir está previsto nos artigos 21.1 e 53 da LSE (ESPANHA,2013) e no Real Decreto 1955/2000 (ESPANHA,2000), de 1 de dezembro. Nesse caso, faz-se necessário um procedimento de autorização mais rigoroso pelo poder público. Adicionalmente, as Comunidades Autônomas (CCAA) podem criar regulamentos específicos aplicáveis às instalações de competência estatal. Se as instalações a ser conectadas a rede utilizarem energias renováveis, cogeração ou resíduos para a produção de energia, estas são reguladas pelo Real Decreto 413/2014 (ESPANHA, 2014), de 6 de julho.

Essa dispersão na regulamentação não contribui para a racionalização e simplificação dos procedimentos técnicos-administrativos impostos pelas regras para promover a geração distribuída. A ausência de regulamentação específica para o regime de autoconsumo de eletricidade levou as várias comunidades autônomas espanholas a ditar as suas próprias regras, dificultando ainda mais a sua regulação.

#### I.3.4 Sistema de Vendas ou Compensação de Excedentes

Em alguns sistemas de microgeração ou minigeração distribuída, a produção de energia produzida pode ser comercializada ou compensada pela empresa distribuidora. As políticas de incentivo podem ser de variadas naturezas: empréstimos, financiamentos, reduções tributárias, divulgação da tecnologia para a sociedade, regulamentações, estímulos à indústria de todo o setor, parcerias internacionais, entre outros (CGEE, 2010).

Os dois sistemas mais utilizados no tratamento econômico da energia excedente produzida são as tarifas prêmio (*Feed-in Tariffs*), que é aquela onde o governo determina o preço pelo kWh que as concessionárias deverão pagar aos produtores de energia, e o

sistema de compensação (*Net Metering*), onde se mede a energia gerada e a consumida, de forma que o consumidor pode compensar o seu consumo (BRASIL, 2012).

Este item visa comparar como se desenham as condições econômicas da produção de energia previstas nos instrumentos normativos objetos desse estudo. Essa análise está disposta na

Tabela I.4:

Tabela I.4: Análise Comparativa do Sistema de venda ou compensação de excedentes das Normas Jurídicas.

<b>Brasil</b>	
<b>Dispositivo Legal</b>	Resolução Normativa nº482/2012 de 17 de abril de 2012.
<b>Sistema venda ou compensação de excedentes</b>	Art. 6º O consumidor poderá aderir ao sistema de compensação de energia elétrica, observadas as disposições desta Resolução. §1º Para fins de compensação, a energia ativa injetada no sistema de distribuição pela unidade consumidora, será cedida a título de empréstimo gratuito para a distribuidora, passando a unidade consumidora a ter um crédito em quantidade de energia ativa a ser consumida por um prazo de 36 (trinta e seis) meses. §2º A adesão ao sistema de compensação de energia elétrica não se aplica aos consumidores livres ou especiais (BRASIL, 2012).
<b>Espanha</b>	
<b>Dispositivo Legal</b>	Lei 24/2013 do Setor Elétrico, de 26 de dezembro de 2013.
<b>Sistema de venda ou compensação de excedentes</b>	Art. 9 apdo. 5º - O Governo estabelecerá as condições administrativas e técnicas para a conexão à rede das instalações com autoconsumo. O Governo estabelecerá também as condições económicas condiciones econômicas para que as instalações da modalidade b) de produção com autoconsumo vendam ao sistema a energia não autoconsumida (Traduzido de ESPANHA, 2013).

O Brasil adotou o sistema de compensação, cuja natureza jurídica é de empréstimo gratuito. A Resolução Normativa Nº 517 (BRASIL, 2012), de 11/12/2012, alterou a Resolução 482/2012 (BRASIL, 2012) e o Módulo 3 do PRODIST (BRASIL, 2012), com objetivo esclarecer o conceito do sistema de compensação de energia, enquadrado como empréstimo gratuito, e limitando seu alcance aos consumidores com mesmo CPF ou CNPJ, de forma a não caracterizar a operação como compra e venda de energia, entre outros aperfeiçoamentos (BRASIL, 2015).

A clareza desse conceito é importante, pois repercute no universo do Direito Tributário, uma vez que deve-se estabelecer sobre qual montante incidem os tributos, em especial, o ICMS (Imposto sobre Operações relativas à Circulação de Mercadorias e



Prestação de Serviços), que é um tributo estadual, e que na maioria dos estados brasileiros, tem como base de cálculo a energia proveniente da distribuidora que chega à unidade consumidora, sem considerar qualquer tipo de compensação.

Se o sistema de compensação tem natureza de empréstimo gratuito, mútuo, por que o ICMS incide sobre toda a energia consumida no mês e não pela energia líquida (gerada-consumida)? Pode-se dizer que esse foi um dos pontos mais controversos do instrumento normativo brasileiro.

Apesar de não ser competência da Agência, a visão da ANEEL é a de que a tributação deveria incidir apenas na diferença, se positiva, entre os valores finais de consumo e energia excedente injetada (geração). Caso a energia excedente injetada seja superior ao consumo, a base de cálculo dos tributos (PIS/COFINS e ICMS) deveria ser apenas o valor do custo de disponibilidade (BRASIL, 2015). Esse entendimento foi adotado, por exemplo, pelo estado de Minas Gerais.

Conforme exposto na normativa, o crédito de energia ativa estará disponível por um período de 36 meses. A compensação ocorre de acordo com o exposto na Figura I.5.

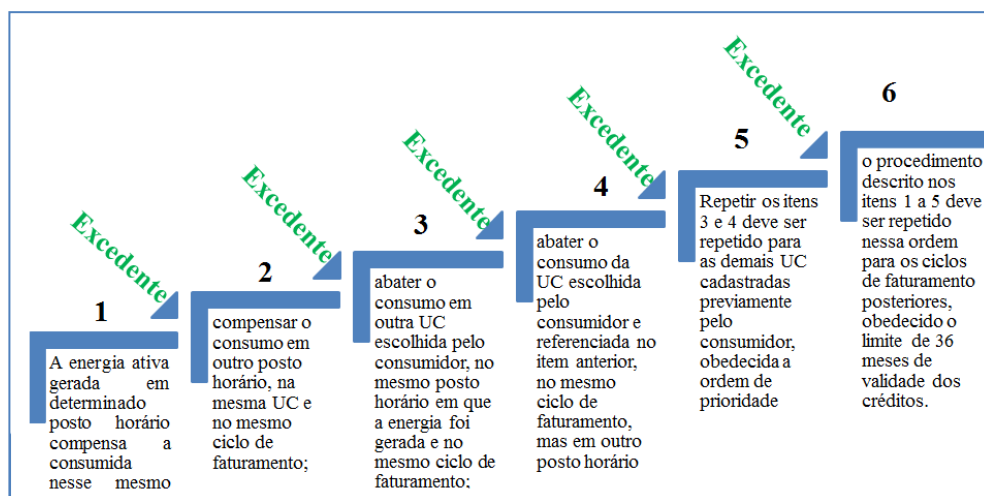


Figura I.5: Sistema de compensação de energia produzida excedente na regulamentação brasileira.

Verifica-se ainda que o sistema de compensação não se aplica a consumidores livres ou especiais, que, em geral, são aqueles que optam por comprar energia de qualquer agente de geração ou comercialização de energia, conforme lei específica.

A previsão legal espanhola é de uma norma geral, indicando apenas que o governo estabelecerá as condições econômicas para as instalações que produzem energia para o

autoconsumo com a possibilidade de venda da energia excedente, não consumida. A norma específica para o autoconsumo ainda não foi regulamentada.

A proposta do real decreto (RÍOS, 2014), em que se estabelecem as condições administrativas, técnicas e econômicas das modalidades de fornecimento de energia elétrica e de produção de energia com autoconsumo, foi enviada à Comissão Nacional de Energia em 18 de Julho de 2013. Essa proposta prevê que o autoconsumo deve contar com um regime regulatório específico, diferenciado do previsto apenas para a produção de energia elétrica, prevendo ainda a possibilidade de que o governo regule um sistema de compensação específico para incentivar a produção de eletricidade a partir de energias renováveis.

O projeto espanhol prevê a obrigação do consumidor/produtor prosseguir a pagar taxas de acesso que lhes são aplicáveis sobre a energia consumida em sua instalação. A energia comprada pelo consumidor, da empresa distribuidora, será obtida a partir dos saldos líquidos, onde são medidas quantidades parciais de produção e consumo horários (hora em hora).

Ainda nesse contexto, a proposta de regulamento, prevê no art. 9.4 (RÍOS, 2014) que não deverá ser criado embargo regulamentário para que o produtor obtenha um preço pela energia não autoconsumida para a possibilidade de venda em mercado.

### I.3.5 Aspectos Contratuais

A análise desse tópico visa comparar como se dá a formalização da relação jurídica. Na análise comparativa serão abordadas as obrigações técnicas, administrativas e financeiras de cada parte, se existe limite da potência instalada previsto e como se configura o esquema de medição de energia ativa. Essa análise está apresentada na Tabela I.5.

Tabela I.5: Análise Comparativa dos Aspectos Contratuais das Normas Jurídicas.

<b>Brasil</b>	
<b>Dispositivo Legal</b>	Resolução Normativa nº482/2012 de 17 de abril de 2012.
<b>Aspectos Contratuais</b>	Art.4º Fica dispensada a assinatura de contratos de uso e conexão na qualidade de central geradora para a microgeração e minigeração distribuída que participe do sistema de compensação de energia elétrica da distribuidora, nos termos do Capítulo III, sendo

	<p>suficiente a celebração de Acordo Operativo para os minigeradores ou do Relacionamento Operacional para os microgeradores. (Redação dada pela REN ANEEL 517, de 11.12.2012)</p> <p>§1º A potência instalada da microgeração ou minigeração distribuída participante do sistema de compensação de energia elétrica fica limitada à carga instalada, no caso de unidade consumidora do grupo B, ou à demanda contratada, no caso de unidade consumidora do grupo A. (Incluído pela REN ANEEL 517, de 11.12.2012)</p> <p>§2º Caso o consumidor deseje instalar microgeração ou minigeração distribuída com potência superior ao limite estabelecido no §1º, deve solicitar aumento da carga instalada, no caso de unidade consumidora do grupo B, ou aumento da demanda contratada, no caso de unidade consumidora do grupo A. (Incluído pela REN ANEEL 517, de 11.12.2012.)</p> <p>Art. 8º Os custos referentes à adequação do sistema de medição, necessário para implantar o sistema de compensação de energia elétrica, são de responsabilidade do interessado.</p> <p>§1º O custo de adequação a que se refere o caput é a diferença entre o custo dos componentes do sistema de medição requerido para o sistema de compensação de energia elétrica e o custo do medidor convencional utilizado em unidades consumidoras do mesmo nível de tensão.</p> <p>Art. 9º Após a adequação do sistema de medição, a distribuidora será responsável pela sua operação e manutenção, incluindo os custos de eventual substituição ou adequação.</p> <p>Art. 10. A distribuidora deverá adequar o sistema de medição dentro do prazo para realização da vistoria e ligação das instalações e iniciar o sistema de compensação de energia elétrica assim que for aprovado o ponto de conexão, conforme procedimentos e prazos estabelecidos na seção 3.7 do Módulo 3 do PRODIST(BRASIL,2012).</p>
--	---

#### **Espanha**

**Dispositivo Legal**

Lei 24/2013 do Setor Elétrico, de 26 de dezembro de 2013.

**Aspectos**

Art. 9 apdo. 3º Todos os consumidores sujeitos a qualquer modalidade de autoconsumo tem a obrigação de contribuir com os custos e serviços do sistema pela energia autoconsumida, quando a instalação de geração ou de consumo estiver conectada total ou parcialmente ao sistema elétrico.

**Contratuais**

Para estes estarão obrigados a pagar as mesmas taxas de acesso às redes, encargos associados aos custos do sistema e custos para a provisão dos servicios de respaldo dosistema que correspondam a um consumidor não sujeito a nenhum das modalidades de autoconsumo descritas no apartado anterior.

O Governo poderá estabelecer regulamentariamente reduções nas ditas taxas, cargos e custos nos sistemas não peninsulares, quando as modalidades de autoconsumo suponham una redução dos custos desses sistemas.

Art. 9 apdo. 4º Os consumidores enquadrados nas modalidades de autoconsumo de energia elétrica têm a obrigação de se inscrever no

registro administrativo de autoconsumo de energia elétrica, pelo Ministério da Indústria, Energia e Turismo. Regulamentariamente, a organização de uma prévia audiência às Comunidades Autônomas e Cidades de Ceuta e Melilla, deve ser estabelecida pelo Governo, assim como o procedimento de inscrição e comunicação de atos ao registro administrativo de autoconsumo de energia elétrica.

Artigo 27. Registro do regime retributivo específico.

1. Para a outorga e seguimento adequado da retribuição específica outorgada às instalações de produção a partir de fontes de energia renováveis, cogeração e resíduos, se lavrarar, no Ministério de Indústria, Energia e Turismo, o registro de regime retributivo específico, que incluirá os parâmetros retributivos aplicáveis a essas instalações.

2. Para terem direito a receber dos regimes retributivos específicos correspondentes, as instalações de produção de energia elétrica ou renovações das existentes deverão estar inscritas no registro de regime retributivo específico. Aquelas instalações que não estejam inscritas no respectivo registro, receberão, exclusivamente, o preço de mercado. (Traduzido de ESPANHA, 2013).

A resolução normativa nº482 da ANEEL é muito didática ao explicar os deveres das partes na relação entre unidade consumidora com microgeração ou minigeração e empresa distribuidora de energia elétrica.

Conforme regulamentado pela normativa brasileira (BRASIL, 2012), não é necessária a assinatura de contratos de uso e conexão na qualidade de unidade geradora com microgeração ou minigeração distribuída que participar do sistema de compensação de energia elétrica. A norma também deixa claro que o limite de potência a ser instalada em microgeração ou minigeração distribuída é a potência da carga instalada, uma vez que não existe a possibilidade de venda do excedente gerado.

Quanto ao sistema de medição, a resolução prevê que os custos para adequação do sistema, atualmente, são alocados aos consumidores que decidem instalar a geração distribuída, devendo-se cobrar apenas diferença entre o custo dos componentes requeridos para o sistema de compensação de energia elétrica (funcionalidade de medição bidirecional) e o custo do medidor convencional utilizado em unidades consumidoras do mesmo nível de tensão (BRASIL, 2015). A responsabilidade pela operação e manutenção dos medidores é da empresa distribuidora de energia.

Acontece que quem define os modelos dos equipamentos a serem adquiridos são as concessionárias de energia, ocasionando uma disparidade muito grande de preços cobrados ao consumidor. Com isso, a agência reguladora, propõe que na próxima revisão na

resolução, o sistema de medição para o consumidor com micro ou minigeração, além de ser instalado pela distribuidora, seja sem custos para o acessante (BRASIL, 2015).

Quanto a alguns aspectos contratuais, a LSE espanhola (ESPAÑA, 2013) regulamenta que os consumidores abrangidos pelo regime de autoconsumo devem se inscrever no Registo Administrativo de Autoconsumo criado pelo Ministério da Indústria, Energia e Turismo. A organização desse registo, o procedimento de inscrição e a comunicação dos dados serão regulamentados pelo governo, ouvidas, em audiência prévia, as CCAA. Está previsto ainda o Registo no Regime Retributivo Específico, também no Ministério da Indústria, Energia e Turismo, e se aplica às instalações de produção a partir de fontes de energia renováveis, cogeração e resíduos; inscrição esta, obrigatória para ter direito aos regimes retributivos específicos correspondentes.

Na Espanha, o autoconsumidor deverá pagar pela energia consumida procedente da instalação de geração conectada a sua rede interna, o chamado “*peaje de respaldo*” (RÍOS, 2014). Após o art. 9 *apdo* 3º da LSE ser regulamentado, se iniciou a tramitação de uma norma para regular as condições administrativas, técnicas e econômicas das distintas modalidades de autoconsumo elétrico.

O primeiro rascunho regulamentário elaborado previa o chamado “*balance neto*” que seria uma espécie de compensação da energia gerada pela consumida da rede. Esse sistema seria vantajoso para o autoconsumidor, uma vez que poderia injetar a energia não consumida, na rede, podendo compensar, no prazo de 12 meses, com a energia que necessitasse adquirir da mesma. Assim, a energia consumida da rede não implicaria em custo para o consumidor, gerando direitos de consumo futuro, e, o mais importante, não seria imposto um custo pela energia autoconsumida.

Esse rascunho regulamentário seguiu um segundo projeto (RÍOS, 2014) que foi enviado em 18 de julho de 2013 à Comissão Nacional, o qual abandonou a ideia do “*balance neto*” e impôs o chamado “*peaje de respaldo*”, que tornaria menos rentável a implantação de sistemas de autoconsumo para tecnologias como a solar fotovoltaica, por exemplo. Esse novo rascunho dispõe que a geração distribuída não reduz os custos de manutenção das redes de distribuição, já que o autoconsumidor, quando conecta sua rede ao sistema, está se beneficiando de tudo que o sistema de distribuição pode proporcionar, ou seja, ele se equipara à uma unidade consumidora, normal, sem qualquer fonte de

geração distribuída instalada. Obviamente, isso não se aplicaria ao autoconsumidor eletricamente isolado.

Nesse sentido, o projeto cria um preço (*peaje de respaldo*), uma espécie de pedágio, para os autoconsumidores, com o intuito de cobrir os custos de manutenção e operação das redes de distribuição. Essa medida desagradou fortemente às empresas que fornecem equipamentos para geração de energia, a partir de fontes renováveis, e vem sendo vista como uma medida que não incentiva o autoconsumo na Espanha.

Se em linhas gerais, a previsão de uma regulamentação específica para o autoconsumo elétrico é positiva, como previsto no art. 9 da LSE (ESPAÑA, 2013), podendo valorar-se como necessária, dois aspectos não incentivam sua implantação na Espanha: a pouca rentabilidade do regime econômico a qual se sujeita e o regime sancionador a qual está associado. A LSE espanhola (ESPAÑA, 2013) enquadra as sanções em grave e muito grave, podendo as multas chegar ao valor de 60.000 euros.

Quanto à potência instalada para o autoconsumo, observa-se que a norma espanhola (ESPAÑA, 2013) não é clara, aplicando-se, por analogia, o critério de tensão estabelecido no item I.2 (Conceitos) deste trabalho.

#### I.4 Considerações Finais

O estudo de Direito Comparado é um instrumento bastante eficaz e enriquecedor na análise de instrumentos normativos que regulam situações análogas. A decisão pela realização de uma análise comparativa de sistemas regulatórios depende do caso concreto e pode fundamentar mudanças nas normas e análises de sistemas vigentes, com o intuito de otimizar a sua utilização.

A análise comparativa proposta nesse trabalho proporcionou uma visão crítica do instrumento regulatório da Geração Distribuída para autoconsumo no Brasil tendo como parâmetro a legislação espanhola. Observou-se que, comparada à regulamentação da Espanha, a resolução normativa nº482 da ANEEL é uma norma específica, clara e que detalha a contento os requisitos necessários para a implantação da microgeração ou minigeração distribuída, tanto para o consumidor, quanto para a empresa distribuidora de energia.

A regulamentação espanhola sobre Geração Distribuída (GD), apesar de o país ser referência nesse tipo de instalação, especificamente para o autoconsumo, ainda é esparsa e alguns pontos importantes carecem de regulamentação.

Vale salientar que não foi objeto desse trabalho a emissão de juízo de valor sobre os regimes jurídico-econômicos adotados por ambos os países, uma vez que a análise de viabilidade da implantação da GD para o autoconsumo, sob a égide desses regimes e utilizando de fontes específicas, deverá ser analisada no caso concreto, podendo ser objeto de um estudo complementar posterior.

O texto deste artigo difere ligeiramente da versão submetida ao IV Simpósio Internacional de Gestão de Projetos, Inovação e Sustentabilidade (IV SINGEP), devido às observações e sugestões apresentadas pela banca examinadora.

## I.5 Referências Bibliográficas

BRASIL, ANEEL. *Resolução Normativa N° 482, de 17 de Abril de 2012*. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências. Disponível em <http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf> . Acesso em 28/06/2015.

BRASIL, ANEEL. *Resolução Normativa N° 517, de 11 de dezembro de 2012*. Altera a Resolução Normativa n° 482, de 17 de abril de 2012, e o Módulo 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST. Disponível em <http://www.aneel.gov.br/cedoc/ren2012517.pdf>. Acesso em 28/06/2015.

BRASIL, ANEEL. *Nota Técnica n° 0017/2015-SRD/ANEEL* – Disponível em [http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2015/026/documento/nota\\_tecnica\\_0017\\_2015\\_srd](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2015/026/documento/nota_tecnica_0017_2015_srd). Acesso em 30/06/2015

BRASIL, ANEEL. *Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST*– Disponível em [http://www.aneel.gov.br/visualizar\\_texto.cfm?idtxt=1867](http://www.aneel.gov.br/visualizar_texto.cfm?idtxt=1867). Acesso em 30/06/2015

BRASIL, MME. *Estudo e propostas de utilização de geração fotovoltaica conectada à rede, em particular em edificações urbanas*. Relatório do Grupo de

Trabalho de Geração Distribuída com Sistemas Fotovoltaicos – GT-GDSF, 2009, p27-31.

BRASIL, EPE. *Análise de Inserção da Geração Solar na Matriz Energética Brasileira*. Nota Técnica – Rio de Janeiro, 2012.

CASTRO, Jr, O.A. *Análise comparativa da regulação dos transportes aéreos nos Estados Unidos e Brasil: breves notas*. Journal of Transport Literature, Vol. 5, n. 2, pp. 163-174, Abril. 2011

CGEE - *Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Energia solar fotovoltaica no Brasil: subsídios para tomada de decisão*. Brasília, 2010. 40 p.

ESPAÑA, BOE (Boletín Oficial Del Estado) *Constitución Española*. Disponível em <http://www.boe.es/legislacion/documentos/ConstitucionCASTELLANO.pdf> acesso em 19/07/2015

ESPAÑA, BOE (Boletín Oficial Del Estado) *Real Decreto 1955/2000* Disponível em <http://www.boe.es/boe/dias/2000/12/27/pdfs/A45988-46040.pdf> acesso em 30/06/2015

ESPAÑA, BOE (Boletín Oficial Del Estado) *Real Decreto 842/2002* Disponível em [http://www.boe.es/diario\\_boe/txt.php?id=BOE-A-2002-18099](http://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2002-18099) acesso em 30/06/2015

ESPAÑA, BOE (Boletín Oficial Del Estado) *Real Decreto 1699/2011* Disponível em <http://www.boe.es/boe/dias/2011/12/08/pdfs/BOE-A-2011-19242.pdf> acesso em 30/06/2015

ESPAÑA, BOE (Boletín Oficial Del Estado) *Real Decreto 24/2013* Disponível em <http://www.boe.es/boe/dias/2013/12/27/pdfs/BOE-A-2013-13645.pdf> acesso em 30/06/2015

ESPAÑA, BOE (Boletín Oficial Del Estado) *Real Decreto 413/2014* Disponível em <http://www.boe.es/boe/dias/2014/06/10/pdfs/BOE-A-2014-6123.pdf> acesso em 30/06/2015

RÍOS G. I. *La incipiente regulación del autoconsumo de energia eléctrica: implicaciones energéticas, ambientales y urbanísticas*. R.V.A.P. núm. especial 99-100. Mayo-Diciembre 2014. Págs. 1623-1649 ISSN: 0211-9560



SERRANO, J. P. *Como utilizar o direito comparado para a Elaboração de Tese Científica*. Rio de Janeiro: Forense, 2006.

SEVERINO, M. M. *Avaliação Técnico-Econômica de um Sistema Híbrido de Geração Distribuída para Atendimento a Comunidades Isoladas da Amazônia. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE. TD- 027/08, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 335 p,2008.*

### Otimização

```

MODEL:
  TITLE Selection of technologies;
!;
DATA:
! A very big number compared to the energy flows of the system;
  BIGN = 200.;
! A very big number compared to the number of pieces of equipment in the system;
  BIGN = 200;
! YVE Sale of electricity allowed (no/yes = 0/1);
  YVE = @FILE('hospitaljp_LCAdata.ltd');
! YCE Purchase of electricity allowed (no/yes = 0/1);
  YCE = @FILE('hospitaljp_LCAdata.ltd');
! YDQ Waste of heat allowed (no/yes = 0/1);
  YDQ = @FILE('hospitaljp_LCAdata.ltd');
! ACEMIN Minimum self-consumption of electricity;
  ACEMIN = @FILE('hospitaljp_LCAdata.ltd');
! PCG Market price for natural gas ($/MWh);
  PCG = @FILE('hospitaljp_LCAdata.ltd');
! PCE Purchase price of electricity($/MWh);
  PCE = @FILE('hospitaljp_LCAdata.ltd');
! CECV/CECV On-peak/Off-peak coefficient for purchase of electricity;
  CECV, CECV = @FILE('hospitaljp_LCAdata.ltd');
! PVE Sale price of self-generated electricity($/MWh);
  PVE = @FILE('hospitaljp_LCAdata.ltd');
! CEVP/CEVV On-peak/Off-peak coefficient for sale of electricity;
  CEVP, CEVV = @FILE('hospitaljp_LCAdata.ltd');
! Factor of indirect inversion costs;
  FCI = @FILE('hospitaljp_LCAdata.ltd');
! Maintenance and capital recovery factor;
  FAM = @FILE('hospitaljp_LCAdata.ltd');
! Purchase price of diesel;
  PDI = @FILE('hospitaljp_LCAdata.ltd');
! Purchase price of biomass;
  PBM = @FILE('hospitaljp_LCAdata.ltd');
! CO2 emissions for natural gas (kg/kWh);
  COGN = @FILE('hospitaljp_LCAdata.ltd');
! CO2 emissions for purchased electricity (kg/kWh);
  COEC = @FILE('hospitaljp_LCAdata.ltd');
! CO2 emissions for exported electricity (kg/kWh);
  COEV = @FILE('hospitaljp_LCAdata.ltd');
! CO2 emissions for diesel (kg/kWh);
  CODI = @FILE('hospitaljp_LCAdata.ltd');
! CO2 emissions for biomass (kg/kWh);
  COBM = @FILE('hospitaljp_LCAdata.ltd');
! FAMCO = maintenance and capital recovery environmental factor;
  FAMCO = @FILE('hospitaljp_LCAdata.ltd');

```

ENDDATA

!;

SETS:

! Utilities (j) 1. CG natural gas;  
! 2. VA high pressure steam;  
! 3. WC hot water;  
! 4. WR cooling water;  
! 5. AA ambient air;  
! 6. WF cold water;  
! 7. EE electricity;  
! 8. DI diesel;  
! 9. BM biomass;

UTIL /CG,VA,WC,WR,AA,WF,EE,DI,BM/: INDPUR, INDDDEM, INDSEL, INDWAS;

! INDPUR indicates the possibility of purchase ( no/yes = 0/1 );

! INDDDEM indicates the possibility of demand ( no/yes = 0/1 );

! INDSEL indicates the possibility of sale ( no/yes = 0/1 );

! INDWAS indicates the possibility of waste ( no/yes = 0/1 );

ENDSETS

DATA:

INDPUR, INDDDEM, INDSEL, INDWAS = @FILE('hospitaljp\_LCAdata.ltd');

ENDDATA

SETS:

! Technologies (i) 1. TGVA gas turbine - cogenerates high pressure steam;  
! 2. MGWC gas engine - cogenerates hot water;  
! 3. CGVA steam boiler - produces high pressure steam;  
! 4. CGWC gas boiler - produces hot water;  
! 5. ICVA heat exchanger - high pressure steam-->hot water;  
! 6. ICWC heat exchanger - hot water-->cold water;  
! 7. FAVA DE absorption chiller - operates on high pressure steam;  
! 8. FAWC SE absorption chiller - operates on hot water;  
! 9. FMWR enfriadora mecanica - operates on electricity;  
! 10. ICWR Cooling tower - cooling water-->ambient air;  
! 11. DIWC Diesel engine;  
! 12. BMWC Biomass hot water boiler;  
! 13. EEVA Steam electric boiler;  
! 14. EEWC Hot water electric boiler;  
! 15. BMVA Biomass steam boiler;

TECN /TGVA,

MGWC,

CGVA, CGWC,

ICVA, ICWC,

FAVA, FAWC, FMWR,

ICWR, DIWC,

BMWC, EEVA, EEWC, BMVA/: YPT, NET, PET, PIN, CBM, FOV, ECO, COV, CIN, PRA;

! YPT Presence of equipment ( no/yes = 0/1 );

! NET Number of pieces of equipment ( 0, 1, .... );

! PET Nominal power of equipment (MW);

! PIN Installed power (MW);

! CBM Cost of installed equipment (\$);

! FOV Variable maintenance and operation costs (\$/MWh);

! ECO CO2 emissions (kgCO2);

! COV Maintenance and operation CO2 emissions (kgCO2/kWh);

! CIN Investment (\$);

! PRA Annual production (MWh/year);

ENDSETS

DATA:

YPT, NET, PET, CBM, FOV, ECO, COV = @FILE('hospitaljp\_LCAdata.lft');

ENDDATA

SETS:

! Days (kd) 1. January ;  
! 2. February ;  
! 3. March ;  
! 4. April ;  
! 5. May ;  
! 6. June ;  
! 7. July ;  
! 8. August ;  
! 9. September ;  
! 10. October ;  
! 11. November ;  
! 12. December ;

DAYS/ JANUARYL, JANUARYW, FEBRUARYL, FEBRUARYW, MARCHL, MARCHW, APRILL, APRILW,  
MAYL, MAYW, JUNEL, JUNEW, JULYL, JULYW, AUGUSTL, AUGUSTW,  
SEPTEMBERL, SEPTEMBERW, OCTOBERL, OCTOBERW, NOVEMBERL, NOVEMBERW,  
DECEMBERL, DECEMBERW

/: NDA, IDT\_INV,  
DVAD, DWCD, DWFD, DEED, DDID,  
CCGD, CEED, VEED, CDID, CBMD, EFVD,  
CTECGD, CTECED, INGVED, CTEOMD, CVARID, CTEDID, CTEBMD,  
CO2GND, CO2ECD, CO2EVD, CO2DID, CO2BMD, CO2OMD, CO2VARD;

! NDA Number of days per year (days/year);  
! IDT\_INV Indicates that the day corresponds to winter electric invoicing ( no/yes = 0/1 );  
! DVAD Steam demand (MWh/day);  
! DWCD How water demand (MWh/day);  
! DWFD Cold water demand (MWh/day);  
! DEED Electricity demand (MWh/day);  
! DDID Diesel demand;  
! CCGD Purchase of natural gas (MWh/day);  
! CEED Purchase of electricity (MWh/day);  
! VEED Sale of electricity (MWh/day);  
! CDID Purchase of diesel (MWh/day);  
! CBMD Purchase of biomass (MWh/day);  
! CTECGD Natural gas cost (\$/day);  
! CTECED Electricity cost (\$/day);  
! INGVED Profit with sale of electricity (\$/day);  
! CTEOMD Variable Operation and maintenance cost (\$/day);  
! CVARID Total variable cost (\$/day);  
! CTEDID Diesel cost (\$/day);  
! CTEBMD Biomass cost (\$/day);  
! CO2GND CO2 emissions natural gas (kg/day);  
! CO2ECD CO2 emissions purchased electricity (kg/day);  
! CO2EVD CO2 emissions exported electricity (kg/day);  
! CO2DID CO2 emissions diesel (kg/day);  
! CO2BMD CO2 emissions biomass (kg/day);  
! CO2VARD CO2 emissions per day (kg/day);

ENDSETS

DATA:

```

NDA = @FILE('hospitaljp_LCAdata.ldt');
IDT_INV = @FILE('hospitaljp_LCAdata.ldt');
ENDDATA
SETS:
! Hours (kh) 1. 1AM 00.00 -> 00.59;
! 2. 2AM 01.00 -> 01.59;
! 3. 3AM 02.00 -> 02.59;
! 4. 4AM 03.00 -> 03.59;
! 5. 5AM 04.00 -> 04.59;
! 6. 6AM 05.00 -> 05.59;
! 7. 7AM 06.00 -> 06.59;
! 8. 8AM 07.00 -> 07.59;
! 9. 9AM 08.00 -> 08.59;
! 10. 10AM 09.00 -> 09.59;
! 11. 11AM 10.00 -> 10.59;
! 12. 12AM 11.00 -> 11.59;
! 1. 2PM 12.00 -> 12.59;
! 2. 2PM 13.00 -> 13.59;
! 3. 3PM 14.00 -> 14.59;
! 4. 4PM 15.00 -> 15.59;
! 5. 5PM 16.00 -> 16.59;
! 6. 6PM 17.00 -> 17.59;
! 7. 7PM 18.00 -> 18.59;
! 8. 8PM 19.00 -> 19.59;
! 9. 9PM 20.00 -> 20.59;
! 10. 10PM 21.00 -> 21.59;
! 11. 11PM 22.00 -> 22.59;
! 12. 12PM 23.00 -> 23.59;

HOURS /1AM 2AM 3AM 4AM 5AM 6AM 7AM 8AM 9AM 10AM 11AM 12AM
1PM 2PM 3PM 4PM 5PM 6PM 7PM 8PM 9PM 10PM 11PM 12PM
/: NHD,
IHPCE_INV, IHVCE_INV, IHPCE_VER, IHVCE_VER,
IHPVE_INV, IHVVE_INV, IHPVE_VER, IHVVE_VER;

! NHD Number of hours per day (hours/day);
! IHPCE_INV Indicator of on-peak purchase of electricity in winter ( no/yes = 0/1 );
! IHVCE_INV Indicator of off-peak purchase of electricity in winter ( no/yes = 0/1 );
! IHPCE_VER Indicator of on-peak purchase of electricity in summer ( no/yes = 0/1 );
! IHVCE_VER Indicator of off-peak purchase of electricity in summer ( no/yes = 0/1 );
! IHPVE_INV Indicator of on-peak sale of electricity in winter ( no/yes = 0/1 );
! IHVVE_INV Indicator of off-peak sale of electricity in winter ( no/yes = 0/1 );
! IHPVE_VER Indicator of on-peak sale of electricity in summer ( no/yes = 0/1 );
! IHVVE_VER Indicator of off-peak sale of electricity in summer ( no/yes = 0/1 );

ENDSETS
DATA:
NHD = @FILE('hospitaljp_LCAdata.ldt');
IHPCE_INV = @FILE('hospitaljp_LCAdata.ldt');
IHVCE_INV = @FILE('hospitaljp_LCAdata.ldt');
IHPCE_VER = @FILE('hospitaljp_LCAdata.ldt');
IHVCE_VER = @FILE('hospitaljp_LCAdata.ldt');
IHPVE_INV = @FILE('hospitaljp_LCAdata.ldt');
IHVVE_INV = @FILE('hospitaljp_LCAdata.ldt');
IHPVE_VER = @FILE('hospitaljp_LCAdata.ldt');
IHVVE_VER = @FILE('hospitaljp_LCAdata.ldt');
ENDDATA
SETS:
!;
```

```

! TecnUtil (i,j);
! Exchanges      CG,      VA,      WC,      WR,      AA,      WF,      EE,      DI,      BM ;
TEUT (TECN,UTIL)/TGVA,CG TGVA,VA TGVA,WC      TGVA,EE
                  MGWC,CG      MGWC,WC MGWC,WR      MGWC,EE
                  CGVA,CG CGVA,VA
                  CGWC,CG      CGWC,WC
                  ICVA,VA ICVA,WC
                  ICWC,WC ICWC,WR
                  FAVA,VA      FAVA,WR      FAVA,WF FAVA,EE
                  FAWC,WC FAWC,WR      FAWC,WF FAWC,EE
                  FMWR,WR      FMWR,WF FMWR,EE
                  ICWR,WR ICWR,AA      ICWR,EE
                  DIWC,WC DIWC,WR      DIWC,EE DIWC,DI
                  BMWC,WC      BMWC,EE      BMWC,EE
                  EEVA,VA      EEVA,EE
                  EEWC,WC      EEWC,EE
                  BMVA,VA      BMVA,EE      BMVA,EE

```

/: INDC, INDP, RIJV;

! INDC Fuel indicator;  
! INDP Product indicator;  
! RIJV Flow/Production;  
!;

! Cogeneration fuel;  
FCIJ (TECN,UTIL)/TGVA,CG  
MGWC,CG  
DIWC,DI /;

!Cogenerated work;  
WCIJ (TECN,UTIL)/TGVA,EE  
MGWC,EE  
DIWC,EE /;

! Cogenerated heat;  
QCIJ (TECN,UTIL)/TGVA,VA TGVA,WC  
MGWC,WC  
DIWC,WC /;

! Waste heat;  
QDIJ (TECN,UTIL)/ICWC,WR/;

! Production of heat by CGVA;  
VABO (TECN,UTIL)/CGVA,VA/;

! Consumption of gas by CGVA;  
VAFF (TECN,UTIL)/CGVA,CG/;

! Production of heat by CGWC;  
HWBO (TECN,UTIL)/CGWC,WC/;

! Consumption of gas by CGWC;  
COCA (TECN,UTIL)/CGWC,CG/;

! Production of heat by BMWC;  
BOBM (TECN,UTIL)/BMWC,WC/;

! Biomass input to BMWC;  
BMBB (TECN,UTIL)/BMWC,BM/;

! Biomass used by biomass boiler VA;  
EEEE (TECN,UTIL)/BMVA,BM/;

! Steam production by biomass boiler VA;  
DDDD (TECN,UTIL)/BMVA,VA/;

! Production of heat by EEWC;  
BOEE (TECN,UTIL)/EEWC,WC/;

! Electricity to EEWC;  
EEBB (TECN,UTIL)/EEWC,EE/;

! Production of heat EEVA;  
BOVA (TECN,UTIL)/EEVA,VA/;

! Electricity to EEVA;  
EECC (TECN,UTIL)/EEVA,EE/;

! WR of engines;  
WRMO (TECN,UTIL)/MGWC,WR  
DIWC,WR/;

! WC of hot water heat exchanger;  
WCII (TECN,UTIL)/ICWC,WC/;

! EE of DE absorption chiller;  
EEDE (TECN,UTIL)/FAVA,EE/;

! WC of DE absorption chiller;  
VADE (TECN,UTIL)/FAVA,VA/;

! WR of DE absorption chiller;  
WRDE (TECN,UTIL)/FAVA,WR/;

! WF of DE absorption chiller;  
WFDE (TECN,UTIL)/FAVA,WF/;

! EE of absorption chiller;  
EEAB (TECN,UTIL)/FAWC,EE/;

! WC of absorption chiller;  
WCAB (TECN,UTIL)/FAWC,WC/;

! WR of absorption chiller;  
WRAB (TECN,UTIL)/FAWC,WR/;

! WF of absorption chiller;  
WFAB (TECN,UTIL)/FAWC,WF/;

! EE of mechanical chiller;  
EEFM (TECN,UTIL)/FMWR,EE/;

! WR of mechanical chiller;  
WRFM (TECN,UTIL)/FMWR,WR/;

! WF of mechanical chiller;

WFFM (TECN,UTIL)/FMWR,WF/;

! WR of the cooling tower;  
WRTO (TECN,UTIL)/ICWR,WR/;

! EE of the cooling tower;  
EETO (TECN,UTIL)/ICWR,EE/;

! AA of the cooling tower;  
AATO (TECN,UTIL)/ICWR,AA/;

! Electricity produced by TGVA;  
TGEE (TECN,UTIL)/TGVA,EE/;

! Syngas input to TGVA;  
TGGGA (TECN,UTIL)/TGVA,CG/;

! Steam by turbine;  
TGSS (TECN,UTIL)/TGVA,VA/;

! Hot Water by turbine;  
TGHW (TECN,UTIL)/TGVA,WC/;

! Electricity by gas engine;  
MGEE (TECN,UTIL)/MGWC,EE/;

! Gas input to gas engine;  
MGGG (TECN,UTIL)/MGWC,CG/;

! WR by gas engine;  
MGRR (TECN,UTIL)/MGWC,WR/;

! Hot Water by gas engine;  
MGHH (TECN,UTIL)/MGWC,WC/;

! Steam by gas engine;  
! MGSS (TECN,UTIL)/MGWC,VA/;

! Electricity by DI engine;  
DIEE (TECN,UTIL)/DIWC,EE/;

! DI input to DI engine;  
DIGG (TECN,UTIL)/DIWC,DI/;

! WR by DI engine;  
DIRR (TECN,UTIL)/DIWC,WR/;

! Hot Water by DI engine;  
DIHH (TECN,UTIL)/DIWC,WC/;

! Steam into ICVA;  
AAAA (TECN,UTIL)/ICVA,VA/;

! Hot water into ICWC;  
BBBB (TECN,UTIL)/ICWC,WC/;

ENDSETS

DATA:



```

INDC = @FILE('hospitaljp_LCAdata.Idt');
INDP = @FILE('hospitaljp_LCAdata.Idt');
RIJV = @FILE('hospitaljp_LCAdata.Idt');
ENDDATA
!;
SETS:
! DaysHours (kd,kh);
  DIHO(DAYS,HOURS): DVAH, DWCH, DWFH, DEEH, DDIH,
    PCEDH, PVEDH, CCGH, CEEH, VEEH, CDIH, CBMH, EFBH,
    YCEH, YVEH, NTS, NMS, NMDS,
    CTECGH, CTECEH, INGVEH, CTEOMH, CVARIH, CTEDIH, CTEBMH, NPS, PPV,
    CO2GNH, CO2ECH, CO2EVH, CO2DIH, CO2BMH, CO2OMH, CO2VARH;
! DVAH  Steam demand      (MWh/h);
! DWCH  Hot water demand  (MWh/h);
! DWFH  Cold water demand (MWh/h);
! DEEH  Electricity demand (MWh/h);
! DDIH  Diesel demand     (MWh/h);
! PCEDH Purchase price electricity ($/MWh);
! PVEDH Sale price electricity ($/MWh);
! CCGH  Purchase natural gas (MWh/h);
! CEEH  Purchase electricity (MWh/h);
! VEEH  Sale electricity     (MWh/h);
! CDIH  Purchase of diesel   (MWh/h);
! CBMH  Purchase of biomass  (MWh/h);
! YCEH  Indicator of electricity purchase (0/1);
! YVEH  Indicator of electricity sale (0/1);
! NTS   Number of turbines in service (0, 1, ...);
! NMS   Number of engines in service (0, 1, ...);
! NMDS  Number of diesel engines in service (0, 1, ...);
! CTECGH Natural gas cost ($/h);
! CTECEH Electricity cost ($/h);
! INGVEH Profit with sale of electricity ($/h);
! CTEOMH Variable Operation and maintenance cost ($/h);
! CVARIH Total variable cost ($/h);
! CTEDIH Diesel cost ($/h);
! CTEBMH Biomass cost ($/h);
! CO2GNH CO2 emissions natural gas (kg/h);
! CO2ECH CO2 emissions purchased electricity (kg/h);
! CO2EVH CO2 emissions exported electricity (kg/h);
! CO2DIH CO2 emissions diesel (kg/h);
! CO2BMH CO2 emissions biomass (kg/h);
! CO2VARH CO2 emissions per hour (kg/h);
! CO2OMH CO2 emissions for operation and maintenance (kg/h);

ENDSETS
DATA:
  DVAH, DWCH, DWFH, DEEH, DDIH = @FILE('hospitaljp_LCAdata.Idt');
ENDDATA
!;
SETS:
! DaysHoursUtility (kd,kh,j);
  DHU(DAYS,HOURS,UTIL): DEMDHU, PURDHU, CONDHU, PRODHU, SELDHU, WASDHU;
! DEMDHU Demand (MWh/h);
! PURDHU Purchase (MWh/h);
! CONDHU Consumption (MWh/h);
! PRODHU Production (MWh/h);
! SELDHU Sale (MWh/h);
! WASDHU Waste (MWh/h);
!;

```

```

! DaysHours Technologies (kd,kh,i);
  DHT(DAYS,HOURS,TECN): PRODHT;
! PRODHT Production (MWh/h);
!;
! DaysHoursTechnologiesUtilities (kd,kh,i,j);
  DHTU(DAYS,HOURS,TECN,UTIL): FDHTU;
! FDHTU Production (MWh/h);
!;
ENDSETS
!;

PCEDH = @OLE('C:\Users\Monica Carvalho\Dropbox\Danielle Bandeira\Artigo LCA\LINGO LCA\HOEP.xlsx','PCEDH');
PVEDH = @OLE('C:\Users\Monica Carvalho\Dropbox\Danielle Bandeira\Artigo LCA\LINGO LCA\HOEP.xlsx','PVEDH');

!Electrical power from each PV system installed;
PPV,CPV,AP,effPV,COPV = @OLE('C:\Users\Monica Carvalho\Dropbox\Danielle Bandeira\Artigo LCA\LINGO
LCA\PV_Artigo_LCA.xlsx','PPV','CPV','AP','effPV','COPV');

! Calculating the daily and annual demands;
@FOR (DAYS(kd):
  DVAD(kd) = @SUM(HOURS(kh): NHD(kh) * DVAH(kd,kh));
  DWCD(kd) = @SUM(HOURS(kh): NHD(kh) * DWCH(kd,kh));
  DWFD(kd) = @SUM(HOURS(kh): NHD(kh) * DWFH(kd,kh));
  DEED(kd) = @SUM(HOURS(kh): NHD(kh) * DEEH(kd,kh));
  DDID(kd) = @SUM(HOURS(kh): NHD(kh) * DDIH(kd,kh));
);
DVA = @SUM(DAYS(kd): NDA(kd) * DVAD(kd));
DWCA = @SUM(DAYS(kd): NDA(kd) * DWCD(kd));
DWFA = @SUM(DAYS(kd): NDA(kd) * DWFD(kd));
DEEA = @SUM(DAYS(kd): NDA(kd) * DEED(kd));
DDIA = @SUM(DAYS(kd): NDA(kd) * DDID(kd));
ENDCALC
!;
! Our Objective -> Minimize annual cost ($/year);
!MIN = ANNUAL_COST;
! Our objective -> Minimize CO2 emissions (kg/year);
MIN = CO2_ANNUAL;

! Economic balance;
@FREE ( ANNUAL_COST );
ANNUAL_COST = AFIXC + AVARC;
! Annual investment cost ($/year);
INVESTMENT = FCI * (@SUM (TECN(i): CIN(i))) + PAINELSOLARTOT;
PAINELSOLARTOT = CPV * NPV;

AFIXC = FAM * (INVESTMENT) ; !+ 1.02 * EECONX);
! Annual operation cost ($/year);
! CTECGA;
CTECGA = @SUM(DAYS(kd): NDA(kd) * CTECGD(kd));
! CTECEA;
CTECEA = @SUM(DAYS(kd): NDA(kd) * CTECED(kd));
! INGVEA;
INGVEA = @SUM(DAYS(kd): NDA(kd) * INGVED(kd));
! CTEOMA;
CTEOMA = @SUM(DAYS(kd): NDA(kd) * CTEOMD(kd));
! CTEDIA;
CTEDIA = @SUM(DAYS(kd): NDA(kd) * CTEDID(kd));
! CTEBMA;

```

```

CTEBMA = @SUM(DAYS(kd): NDA(kd) * CTEBMD(kd));
! CVARIA;
@FREE (AVARC);
AVARC = CTECGA + CTECEA - INGVEA + CTEOMA + CTEDIA + CTEBMA;

! Daily operation cost ($/day);
@FOR (DAYS(kd):
! CTECGD;
CTECGD(kd) = @SUM(HOURS(kh): NHD(kh) * CTECGH(kd,kh));
! CTECED;
CTECED(kd) = @SUM(HOURS(kh): NHD(kh) * CTECEH(kd,kh));
! INGVED;
INGVED(kd) = @SUM(HOURS(kh): NHD(kh) * INGVEH(kd,kh));
! CTEOMD;
CTEOMD(kd) = @SUM(HOURS(kh): NHD(kh) * CTEOMH(kd,kh));
! CTEDID;
CTEDID(kd) = @SUM(HOURS(kh): NHD(kh) * CTEDIH(kd,kh));
! CTEBMD;
CTEBMD(kd) = @SUM(HOURS(kh): NHD(kh) * CTEBMH(kd,kh));
! CVARID;
@FREE (CVARID(kd));
CVARID(kd) = CTECGD(kd) + CTECED(kd) - INGVED(kd) + CTEOMD(kd) + CTEDID(kd) + CTEBMD(kd);
);
! Hourly operation cost ($/hour);
@FOR (DIHO(kd, kh):
! CTECGH;
CTECGH(kd,kh) = PCG * CCGH(kd,kh);
! CTECEH;
CTECEH(kd,kh) = (PCEDH(kd,kh) + 0 ) * ( CEEH(kd,kh)); !+ CEEH(kd,kh)*3e6/(115e3)^2*0.5*DTRANS);
! INGVEH;
INGVEH(kd,kh) = PVEDH(kd,kh) * VEEH(kd,kh);
! CTEOMH;
CTEOMH(kd,kh) = (@SUM(TECN(i): FOV(i) * PRODHT(kd,kh,i)));
! CTEDIH;
CTEDIH(kd,kh) = PDI * CDIH(kd,kh);
! CTEBMH;
CTEBMH(kd,kh) = PBM * CBMH(kd,kh);
! CVARIH;
@FREE (CVARIH(kd,kh));
CVARIH(kd,kh) = CTECGH(kd,kh) + CTECEH(kd,kh) - INGVEH(kd,kh) + CTEOMH(kd,kh) + CTEDIH(kd,kh) +
CTEBMH(kd,kh);
);

!*****;
! CO2 balance;
@FREE ( CO2_ANNUAL );
CO2_ANNUAL = CO2FIX + CO2VAR;
! CO2 annual investment (kg/year);
CO2INV = @SUM (TECN(i): NET(i) * ECO(i)) + PAINELCO2;
PAINELCO2 = COPV * NPV;
CO2FIX = FAMCO * CO2INV;

! Annual CO2 amissions(kg/year);
! CO2GNA;
CO2GNA = @SUM(DAYS(kd): NDA(kd) * CO2GND(kd));
! CO2ECA;
CO2ECA = @SUM(DAYS(kd): NDA(kd) * CO2ECD(kd));
! CO2EVA;
CO2EVA = @SUM(DAYS(kd): NDA(kd) * CO2EVD(kd));

```

```

! CO2DIA;
CO2DIA = @SUM(DAYS(kd): NDA(kd) * CO2DID(kd));
! CO2BMA;
CO2BMA = @SUM(DAYS(kd): NDA(kd) * CO2BMD(kd));
! CO2OMA;
CO2OMA = @SUM(DAYS(kd): NDA(kd) * CO2OMD(kd));
! CO2VAR;
@FREE (CO2VAR);
CO2VAR = CO2GNA + CO2ECA - CO2EVA + CO2DIA + CO2BMA + CO2OMA;

! Daily CO2 emissions(kg/day);
@FOR (DAYS(kd):
! CO2GND;
CO2GND(kd) = @SUM(HOURS(kh): NHD(kh) * CO2GNH(kd,kh));
! CO2ECD;
CO2ECD(kd) = @SUM(HOURS(kh): NHD(kh) * CO2ECH(kd,kh));
! CO2EVD;
CO2EVD(kd) = @SUM(HOURS(kh): NHD(kh) * CO2EVH(kd,kh));
! CO2DID;
CO2DID(kd) = @SUM(HOURS(kh): NHD(kh) * CO2DIH(kd,kh));
! CO2BMD;
CO2BMD(kd) = @SUM(HOURS(kh): NHD(kh) * CO2BMH(kd,kh));
! CO2OMD;
CO2OMD(kd) = @SUM(HOURS(kh): NHD(kh) * CO2OMH(kd,kh));
! CO2VARD;
@FREE (CO2VARD(kd));
CO2VARD(kd) = CO2GND(kd) + CO2ECD(kd) - CO2EVD(kd) + CO2DID(kd) + CO2BMD(kd) + CO2OMD(kd);
);
! Hourly CO2 emissions(kg/hour);
@FOR (DIHO(kd, kh):
! CO2GNH;
CO2GNH(kd,kh) = COGN * 1000 * CCGH(kd,kh);
! CO2ECH;
CO2ECH(kd,kh) = COEC * 1000 * CEEH(kd,kh);
! CO2EVH;
CO2EVH(kd,kh) = COEV * 1000 * VEEH(kd,kh);
! CO2DIH;
CO2DIH(kd,kh) = CODI * 1000 * CDIH(kd,kh);
! CO2BMH;
CO2BMH(kd,kh) = COBM * 1000 * CBMH(kd,kh);
! CO2OMH;
CO2OMH(kd,kh) = @SUM(TECN(i): COV(i) * 1000 * PRODHT(kd,kh,i));
! CO2VARH;
@FREE (CO2VARH(kd,kh));
CO2VARH(kd,kh) = CO2GNH(kd,kh) + CO2ECH(kd,kh) - CO2EVH(kd,kh) + CO2DIH(kd,kh) + CO2BMH(kd,kh) +
CO2OMH(kd,kh);
);

@BIN (YCE);
! Technologies;
@FOR (TECN(i):
@BIN (YPT(i)); @GIN (NET(i));
NET(i) <= YPT(i) * BIGN;
PIN(i) = NET(i) * PET(i);
CIN(i) = NET(i) * CBM(i) ;
PRA(i) = @SUM (DHT(kd,kh,i): NDA(kd)*NHD(kh)*PRODHT(kd,kh,i));

```

);

! Do not sell electricity if there is no cogeneration;  
YVE <= YPT(@INDEX(TGVA)) + YPT(@INDEX(MGWC))+ YPT(@INDEX(DIWC)) ;

! Production limits;

@FOR(DAYS(kd):

@FOR(HOURS(kh):

@GIN(NTS(kd,kh)); NTS(kd,kh) <= NET(@INDEX(TGVA)); PRODHT(kd,kh,@INDEX(TGVA)) = NTS(kd,kh) \*  
PET(@INDEX(TGVA));

@GIN(NMS(kd,kh)); NMS(kd,kh) = NET(@INDEX(MGWC)); PRODHT(kd,kh,@INDEX(MGWC)) = NMS(kd,kh) \*  
PET(@INDEX(MGWC));

@GIN(NMDS(kd,kh)); NMDS(kd,kh) <= NET(@INDEX(DIWC)); PRODHT(kd,kh,@INDEX(DIWC)) = NMDS(kd,kh) \*  
PET(@INDEX(DIWC));

@FOR (TECN(i):

PRODHT(kd,kh,i) <= PIN(i);

);

);

);

!Colectores solares instalados simultaneamente;

@GIN(NPV);

!@GIN(NPV2);

NPV = 200; ! Limitation of number of PV panels installed. Can be completely removed if = 0 \*\*\*\*\*;

@FOR(DAYS(kd):

@FOR(HOURS(kh):

@GIN(NPS(kd,kh)); ! \*\*\*\*\*;

NPS(kd,kh) = NPV;

);

);

POTMOT = PIN(@INDEX(TGVA)) + PIN(@INDEX(MGWC)) + PIN(@INDEX(DIWC)) ;

! Flows;

@FOR (DAYS(kd):

@FOR(HOURS(kh):

@FOR(TEUT(i,j):

FDHTU(kd,kh,i,j) = PRODHT(kd,kh,i) \* RIJV(i,j);

);

);

);

! Utility balances;

@FOR(DAYS(kd):

@FOR(HOURS(kh):

@FOR(UTIL(j):

CONDHU(kd,kh,j) = @SUM(TEUT(i,j): INDC(i,j)\*FDHTU(kd,kh,i,j));

PRODHU(kd,kh,j) = @SUM(TEUT(i,j): INDP(i,j)\*FDHTU(kd,kh,i,j));

PURDHU(kd,kh,j) <= INDPUR(j) \* BIGR;

DEMDHU(kd,kh,j) <= INDDDEM(j) \* BIGR;

SELDHU(kd,kh,j) <= INDSEL(j) \* BIGR;

WASDHU(kd,kh,j) <= INDWAS(j) \* BIGR;

);

);

);

!Balance of utilities ONLY ELECTRICITY;

@FOR(DAYS(kd):

@FOR(HOURS(kh):

EFVH(kd,kh) = NPS(kd,kh) \* AP \* PPV(kd,kh) \* effPV/1000 ; !\*\*\*Aqui divido por 1000 porque a unidade de PPV esta em W/m2;

@FOR(UTIL(j)|(j#EQ#7):

PURDHU(kd,kh,j) + PRODHU(kd,kh,j) = CONDHU(kd,kh,j) + DEMDHU(kd,kh,j)

+ SELDHU(kd,kh,j) + WASDHU(kd,kh,j) - EFVH(kd,kh);!BALANCE OF PRODUCTION,SALE,... FOR ELECTRICITY (j=7)

;

);

);

);

! Relationships and limitations for purchase-sale of electricity;

@FOR(DAYS(kd):

@FOR(HOURS(kh):

DEMDHU(kd,kh,@INDEX(va)) = DVAH(kd,kh);

DEMDHU(kd,kh,@INDEX(wc)) = DWCH(kd,kh);

DEMDHU(kd,kh,@INDEX(wf)) = DWFH(kd,kh);

DEMDHU(kd,kh,@INDEX(ee)) = DEEH(kd,kh);

DEMDHU(kd,kh,@INDEX(di)) = DDIH(kd,kh);

!;

CCGH(kd,kh) = PURDHU(kd,kh,@INDEX(cg));

CEEH(kd,kh) = PURDHU(kd,kh,@INDEX(ee)); ! CEEH(kd,kh) <= YCE\*PCONXMAX ; CEEH(kd,kh)

<=YCE\*BIGR; ! CEEH (kd,kh) = 0;

VEEH(kd,kh) = SELDHU(kd,kh,@INDEX(ee)); !VEEH(kd,kh) <= YVE\*PCONXMAX ; VEEH(kd,kh) <=

YVE\*BIGR;

CDIH(kd,kh) = PURDHU(kd,kh,@INDEX(di)); !CDIH(kd,kh) <= 8;

CBMH(kd,kh) = PURDHU(kd,kh,@INDEX(bm));

);

);

! Daily and yearly results;

@FOR (DAYS(kd):

! CCGD;

CCGD(kd) = @SUM(HOURS(kh): NHD(kh) \* CCGH(kd,kh));

! CEED;

CEED(kd) = @SUM(HOURS(kh): NHD(kh) \* CEEH(kd,kh));

! VEED;

VEED(kd) = @SUM(HOURS(kh): NHD(kh) \* VEEH(kd,kh));

! CDID;

CDID(kd) = @SUM(HOURS(kh): NHD(kh) \* CDIH(kd,kh));

! CBMD;

CBMD(kd) = @SUM(HOURS(kh): NHD(kh) \* CBMH(kd,kh));

EFVD(kd) = @SUM(HOURS(kh): NHD(kh) \* EFVH(kd,kh));

);

CCGA = @SUM(DAYS(kd): NDA(kd) \* CCGD(kd));

CEEA = @SUM(DAYS(kd): NDA(kd) \* CEED(kd));

VEEA = @SUM(DAYS(kd): NDA(kd) \* VEED(kd));

CDIA = @SUM(DAYS(kd): NDA(kd) \* CDID(kd)); !CDIA <=100000;

CBMA = @SUM(DAYS(kd): NDA(kd) \* CBMD(kd));

EFVA = @SUM(DAYS(kd): NDA(kd) \* EFVD(kd));

! More results;

! Annual fuel consumed by cogeneration equipment;  
FCO = @SUM(FCIJ(i,j): PRA(i)\* RIJV(i,j) );  
! Annual cogenerated work;  
WCO = @SUM(WCIJ(i,j): PRA(i)\* RIJV(i,j) );  
! Annual cogenerated heat;  
QCO = @SUM(QCIJ(i,j): PRA(i)\* RIJV(i,j) );  
! Annual waste heat;  
QCD = @SUM(QDIJ(i,j): PRA(i)\* RIJV(i,j) );  
! 3. DO NOT waste thermal energy;  
!QCD <= YDQ\*BIGR\*8760;  
! Consumed cogenerated heat;  
QCC = QCO - QCD;

VAB = @SUM(VABO(i,j): PRA(i)\*RIJV(i,j) );  
VAF = @SUM(VAFF(i,j): PRA(i)\*RIJV(i,j) );  
HWB = @SUM(HWBO(i,j): PRA(i)\*RIJV(i,j) );  
COC = @SUM(COCA(i,j): PRA(i)\*RIJV(i,j) );  
BOB = @SUM(BOBM(i,j): PRA(i)\*RIJV(i,j) );  
BMB = @SUM(BMBB(i,j): PRA(i)\*RIJV(i,j) );  
DDD = @SUM(DDDD(i,j): PRA(i)\*RIJV(i,j) );  
EEE = @SUM(EEEE(i,j): PRA(i)\*RIJV(i,j) );  
BOE = @SUM(BOEE(i,j): PRA(i)\*RIJV(i,j) );  
EEB = @SUM(EEBB(i,j): PRA(i)\*RIJV(i,j) );  
BOV = @SUM(BOVA(i,j): PRA(i)\*RIJV(i,j) );  
EEC = @SUM(EECC(i,j): PRA(i)\*RIJV(i,j) );  
WRM = @SUM(WRMO(i,j): PRA(i)\*RIJV(i,j) );  
WCI = @SUM(WCII(i,j): PRA(i)\*RIJV(i,j) );  
EED = @SUM(EEDE(i,j): PRA(i)\*RIJV(i,j) );  
VAD = @SUM(VADE(i,j): PRA(i)\*RIJV(i,j) );  
WRD = @SUM(WRDE(i,j): PRA(i)\*RIJV(i,j) );  
WFD = @SUM(WFDE(i,j): PRA(i)\*RIJV(i,j) );  
EEA = @SUM(EEAB(i,j): PRA(i)\*RIJV(i,j) );  
WCA = @SUM(WCAB(i,j): PRA(i)\*RIJV(i,j) );  
WRA = @SUM(WRAB(i,j): PRA(i)\*RIJV(i,j) );  
WFA = @SUM(WFAB(i,j): PRA(i)\*RIJV(i,j) );  
EEF = @SUM(EEFM(i,j): PRA(i)\*RIJV(i,j) );  
WRF = @SUM(WRFM(i,j): PRA(i)\*RIJV(i,j) );  
WFF = @SUM(WFFM(i,j): PRA(i)\*RIJV(i,j) );  
WRT = @SUM(WRTO(i,j): PRA(i)\*RIJV(i,j) );  
EET = @SUM(EETO(i,j): PRA(i)\*RIJV(i,j) );  
AAT = @SUM(AATO(i,j): PRA(i)\*RIJV(i,j) );  
TGE = @SUM(TGEE(i,j): PRA(i)\*RIJV(i,j) );  
TGG = @SUM(TGGA(i,j): PRA(i)\*RIJV(i,j) );  
TGS = @SUM(TGSS(i,j): PRA(i)\*RIJV(i,j) );  
TGH = @SUM(TGHW(i,j): PRA(i)\*RIJV(i,j) );  
MGE = @SUM(MGEE(i,j): PRA(i)\*RIJV(i,j) );  
MGG = @SUM(MGGG(i,j): PRA(i)\*RIJV(i,j) );  
MGR = @SUM(MGRR(i,j): PRA(i)\*RIJV(i,j) );  
MGH = @SUM(MGHH(i,j): PRA(i)\*RIJV(i,j) );  
DIR = @SUM(DIRR(i,j): PRA(i)\*RIJV(i,j) );  
DIE = @SUM(DIEE(i,j): PRA(i)\*RIJV(i,j) );  
DIG = @SUM(DIGG(i,j): PRA(i)\*RIJV(i,j) );  
DIH = @SUM(DIHH(i,j): PRA(i)\*RIJV(i,j) );  
AAA = @SUM(AAAA(i,j): PRA(i)\*RIJV(i,j) );  
BBB = @SUM(BBBB(i,j): PRA(i)\*RIJV(i,j) );

CALC:  
@SET( 'TERSEO', 1);

```

@SET( 'LINLEN', 120);
!Solving the model;
@SOLVE( );
!Print results in file;
@DIVERT( 'hospitalip_RESULTSLSA.txt', 'A' );
@WRITE( ' Equipamento instalado: ', @NEWLINE(2) ,
' Gas fuelled gas turbine : ', NET(@INDEX(TGVA)),
', (kW) = ', @FLOOR( 1000*PIN(@INDEX(TGVA))), ', (R$/unid) = ', CBM(@INDEX(TGVA)), @NEWLINE(1),
' Grupo gerador a gas : ', NET(@INDEX(MGWC)),
', (kW) = ', @FLOOR( 1000*PIN(@INDEX(MGWC))), ', (R$/unid) = ', CBM(@INDEX(MGWC)), ', (emissões) = ',
ECO(@INDEX(MGWC)), @NEWLINE(1),
' Grupo gerador a diesel : ', NET(@INDEX(DIWC)),
', (kW) = ', @FLOOR( 1000*PIN(@INDEX(DIWC))), ', (R$/unid) = ', CBM(@INDEX(DIWC)), ', (emissões) = ',
ECO(@INDEX(DIWC)), @NEWLINE(1),
' Caldeira Vapor (GN) : ', NET(@INDEX(CGVA)),
', (kW) = ', @FLOOR( 1000*PIN(@INDEX(CGVA))), ', (R$/unid) = ', CBM(@INDEX(CGVA)), ', (emissões) = ',
ECO(@INDEX(CGVA)), @NEWLINE(1),
' Caldeira Agua Quent (GN): ', NET(@INDEX(CGWC)),
', (kW) = ', @FLOOR( 1000*PIN(@INDEX(CGWC))), ', (R$/unid) = ', CBM(@INDEX(CGWC)), ', (emissões) = ',
ECO(@INDEX(CGWC)), @NEWLINE(1),
' Caldeira Vapor (BM) : ', NET(@INDEX(BMVA)),
', (kW) = ', @FLOOR( 1000*PIN(@INDEX(BMVA))), ', (R$/unid) = ', CBM(@INDEX(BMVA)), ', (emissões) = ',
ECO(@INDEX(BMVA)), @NEWLINE(1),
' Caldeira Agua Quent (BM): ', NET(@INDEX(BMWC)),
', (kW) = ', @FLOOR( 1000*PIN(@INDEX(BMWC))), ', (R$/unid) = ', CBM(@INDEX(BMWC)), ', (emissões) = ',
ECO(@INDEX(BMWC)), @NEWLINE(1),
' Caldeira Vapor (EE) : ', NET(@INDEX(EEVA)),
', (kW) = ', @FLOOR( 1000*PIN(@INDEX(EEVA))), ', (R$/unid) = ', CBM(@INDEX(EEVA)), ', (emissões) = ',
ECO(@INDEX(EEVA)), @NEWLINE(1),
' Caldeira Agua Quent (EE): ', NET(@INDEX(EEWC)),
', (kW) = ', @FLOOR( 1000*PIN(@INDEX(EEWC))), ', (R$/unid) = ', CBM(@INDEX(EEWC)), ', (emissões) = ',
ECO(@INDEX(EEWC)), @NEWLINE(1),
' Trocador Calor VA -> WC: ', NET(@INDEX(ICVA)),
', (kW) = ', @FLOOR( 1000*PIN(@INDEX(ICVA))), ', (R$/unid) = ', CBM(@INDEX(ICVA)), ', (emissões) = ',
ECO(@INDEX(ICVA)), @NEWLINE(2);
);

@WRITE( ' More equipment: ', @NEWLINE(2) ,

' Chiller Absorcao 2 X : ', NET(@INDEX(FAVA)),
', (kW) = ', @FLOOR( 1000*PIN(@INDEX(FAVA))), ', (R$/unid) = ', CBM(@INDEX(FAVA)), ', (emissões) = ',
ECO(@INDEX(FAVA)), @NEWLINE(1),
' Chiller Absorcao 1 X : ', NET(@INDEX(FAWC)),
', (kW) = ', @FLOOR( 1000*PIN(@INDEX(FAWC))), ', (R$/unid) = ', CBM(@INDEX(FAWC)), ', (emissões) = ',
ECO(@INDEX(FAWC)), @NEWLINE(1),
' Chiller Mecanico : ', NET(@INDEX(FMWR)),
', (kW) = ', @FLOOR( 1000*PIN(@INDEX(FMWR))), ', (R$/unid) = ', CBM(@INDEX(FMWR)), ', (emissões) = ',
ECO(@INDEX(FMWR)), @NEWLINE(1),
' Torre de resfriamento : ', NET(@INDEX(ICWR)),
', (kW) = ', @FLOOR( 1000*PIN(@INDEX(ICWR))), ', (R$/unid) = ', CBM(@INDEX(ICWR)), ', (emissões) = ',
ECO(@INDEX(ICWR)), @NEWLINE(1),
' Trocador Calor WC -> WR : ', NET(@INDEX(ICWC)),
', (kW) = ', @FLOOR( 1000*PIN(@INDEX(ICWC))), ', (R$/unid) = ', CBM(@INDEX(ICWC)), ', (emissões) = ',
ECO(@INDEX(ICWC)), @NEWLINE(2),

' Paineis Fotovoltaicos : ', @FORMAT (NPV, '4.2f'), ', (R$/unid) = ', @FORMAT (CPV, '4.2f'), ', (emissões) = ',
@FORMAT(COPV, '4.2f'), @NEWLINE (2);
);

```



```

@WRITE(' Preço da eletricidade C (R$/MWh) = ', @FORMAT(PCE, '12.0f'), @NEWLINE(1));
@WRITE(' Preço da eletricidade V (R$/MWh) = ', @FORMAT(PVE, '12.0f'), @NEWLINE(1));
@WRITE(' Preço do gas natural (R$/MWh) = ', @FORMAT(PCG, '12.0f'), @NEWLINE(1));
@WRITE(' Preço do diesel (R$/MWh) = ', @FORMAT(PDI, '12.0f'), @NEWLINE(1));
@WRITE(' Preço da biomassa (R$/MWh) = ', @FORMAT(PBM, '12.0f'), @NEWLINE(2));

@WRITE(' Emissões eletricidade C (___/MWh) = ', @FORMAT(1000*COEC, '12.0f'), @NEWLINE(1));
@WRITE(' Emissões eletricidade V (___/MWh) = ', @FORMAT(1000*COEV, '12.0f'), @NEWLINE(1));
@WRITE(' Emissões do gas natural (___/MWh) = ', @FORMAT(1000*COGN, '12.0f'), @NEWLINE(1));
@WRITE(' Emissões do diesel (___/MWh) = ', @FORMAT(1000*CODI, '12.0f'), @NEWLINE(1));
@WRITE(' Emissões da biomassa (___/MWh) = ', @FORMAT(1000*COBM, '12.0f'), @NEWLINE(2));

@WRITE(' Investimento inicial em equipamentos (R$) = ', @FORMAT(INVESTMENT, '12.0f'), @NEWLINE(2));
CUSTOPAINAIS = CPV * NPV;
@WRITE(' Custo com paineis PV (R$) = ', @FORMAT(CUSTOPAINAIS, '12.0f'), @NEWLINE(1));
@WRITE(' Custo TOTAL (R$/ano) = ', @FORMAT(ANNUAL_COST, '12.0f'), @NEWLINE(2));
@WRITE(' Custo de equipamentos (inclui TS, PV...) (R$/ano) = ', @FORMAT(AFIXC, '12.0f'), @NEWLINE(1));
);
ANNUALVAR = AVARC - CTEOMA;
@WRITE(' Custos variaveis (R$/ano) = ', @FORMAT(AVARC, '12.0f'), @NEWLINE(1));
@WRITE(' O&M Custos (R$/ano) = ', @FORMAT(CTEOMA, '12.0f'), @NEWLINE(3));

@WRITE(' Investimento inicial em equipamentos (Emissões) = ', @FORMAT(CO2INV, '12.0f'), @NEWLINE(2));
@WRITE(' Emissões TOTAIS (Emissão/ano) = ', @FORMAT(CO2_ANNUAL, '12.0f'), @NEWLINE(2));
@WRITE(' Emissão de equipamentos (inclui TS, PV...) (Emissão/ano) = ', @FORMAT(CO2FIX, '12.0f'), @NEWLINE(1));
);
ANNUALVARCO2 = CO2VAR - CO2OMA;
@WRITE(' Emissões variáveis (Emissão/ano) = ', @FORMAT(CO2VAR, '12.0f'), @NEWLINE(1));
@WRITE(' O&M Emissões (emissão/ano) = ', @FORMAT(CO2OMA, '12.0f'), @NEWLINE(3));

@WRITE(' Fluxos de energia (MWh/ano) : ', @NEWLINE(2));
@WRITE(' Demanda de vapor = ', @FORMAT(DVAA, '12.0f'), @NEWLINE(1));
@WRITE(' Demanda de calor = ', @FORMAT(DWCA, '12.0f'), @NEWLINE(1));
@WRITE(' Demanda de frio = ', @FORMAT(DWFA, '12.0f'), @NEWLINE(1));
@WRITE(' Demanda de eletricidade = ', @FORMAT(DEEA, '12.0f'), @NEWLINE(1));
@WRITE(' Demanda de diesel = ', @FORMAT(DDIA, '12.0f'), @NEWLINE(1));
@WRITE(' Importacao de gas natural = ', @FORMAT(CCGA, '12.0f'), ' Custo (R$/ano) = ', @FORMAT(CTECGA, '12.0f'), ' Emissões (___/ano) = ', @FORMAT(CO2GNA, '12.0f'), @NEWLINE(1));
@WRITE(' Importacao de electricidad = ', @FORMAT(CEEA, '12.0f'), ' Custo (R$/ano) = ', @FORMAT(CTECEA, '12.0f'), ' Emissões (___/ano) = ', @FORMAT(CO2ECA, '12.0f'), @NEWLINE(1));
@WRITE(' Fotovoltaica eletricidade = ', @FORMAT(EFVA, '12.0f'), @NEWLINE(1));
@WRITE(' EXPORTAÇÃO de eletricidade = ', @FORMAT(VEEA, '12.0f'), ' Renda (R$/ano) = ', @FORMAT(INGVEA, '12.0f'), ' Emissões (___/ano) = ', @FORMAT(CO2EVA, '12.0f'), @NEWLINE(1));
@WRITE(' Importacao de diesel = ', @FORMAT(CDIA, '12.0f'), ' Custo (R$/ano) = ', @FORMAT(CTEDIA, '12.0f'), ' Emissões (___/ano) = ', @FORMAT(CO2DIA, '12.0f'), @NEWLINE(1));
@WRITE(' Importacao de biomassa = ', @FORMAT(CBMA, '12.0f'), ' Custo (R$/ano) = ', @FORMAT(CTEBMA, '12.0f'), ' Emissões (___/ano) = ', @FORMAT(CO2BMA, '12.0f'), @NEWLINE(2));

@WRITE(' FLUXOS ANUAIS (MWh) ', @NEWLINE(2));
@WRITE(' Combustivel para cogerao = ', @FORMAT(FCO, '6.0f'), @NEWLINE(1));
@WRITE(' Trabalho cogerao = ', @FORMAT(WCO, '6.0f'), @NEWLINE(1));
@WRITE(' Calor cogerao = ', @FORMAT(QCO, '6.0f'), @NEWLINE(1));
@WRITE(' Calor cogerao consumido = ', @FORMAT(QCC, '6.0f'), @NEWLINE(1));
@WRITE(' Calor despilfarrado = ', @FORMAT(QCD, '6.0f'), @NEWLINE(2));

@WRITE(' Gas consumption for TGVA = ', @FORMAT(TGG, '6.0f'), @NEWLINE(1));
@WRITE(' Steam from TGVA = ', @FORMAT(TGS, '6.0f'), @NEWLINE(1));
@WRITE(' Hot water from TGVA = ', @FORMAT(TGH, '6.0f'), @NEWLINE(1));
@WRITE(' Electricity from TGVA = ', @FORMAT(TGE, '6.0f'), @NEWLINE(2));

```

```

@WRITE(' Gas consumption for MGWC = ', @FORMAT(MGG,'6.0f'), @NEWLINE(1) );
@WRITE(' WR from MGWC      = ', @FORMAT(MGR,'6.0f'), @NEWLINE(1) );
@WRITE(' Hot water from MGWC  = ', @FORMAT(MGH,'6.0f'), @NEWLINE(1) );
@WRITE(' Electricity from MGWC = ', @FORMAT(MGE,'6.0f'), @NEWLINE(2) );

@WRITE(' DI consumption for DIWC = ', @FORMAT(DIG,'6.0f'), @NEWLINE(1) );
@WRITE(' Hot water from DIWC    = ', @FORMAT(DIH,'6.0f'), @NEWLINE(1) );
@WRITE(' WR from DIWC          = ', @FORMAT(DIR,'6.0f'), @NEWLINE(1) );
@WRITE(' Electricity from DIWC   = ', @FORMAT(DIE,'6.0f'), @NEWLINE(2) );

@WRITE(' Steam from steam boiler = ', @FORMAT(VAB,'6.0f'), @NEWLINE(1) );
@WRITE(' Fuel for CGVA           = ', @FORMAT(VAF,'6.0f'), @NEWLINE(2) );

@WRITE(' Heat from hot water boiler= ', @FORMAT(HWB,'6.0f'), @NEWLINE(1) );
@WRITE(' Fuel for CGWC            = ', @FORMAT(COC,'6.0f'), @NEWLINE(2) );

@WRITE(' Heat from BM VA boiler  = ', @FORMAT(DDD,'6.0f'), @NEWLINE(1) );
@WRITE(' Biomass for boiler       = ', @FORMAT(EEE,'6.0f'), @NEWLINE(2) );

@WRITE(' Heat from BM HW boiler   = ', @FORMAT(BOB,'6.0f'), @NEWLINE(1) );
@WRITE(' Biomass for boiler       = ', @FORMAT(BMB,'6.0f'), @NEWLINE(2) );

@WRITE(' Heat from EE VA boiler   = ', @FORMAT(BOV,'6.0f'), @NEWLINE(1) );
@WRITE(' Electricity to boiler    = ', @FORMAT(EEC,'6.0f'), @NEWLINE(2) );

@WRITE(' Heat from EE HW boiler   = ', @FORMAT(BOE,'6.0f'), @NEWLINE(1) );
@WRITE(' Electricity to boiler    = ', @FORMAT(EEB,'6.0f'), @NEWLINE(2) );

@WRITE(' EE of DE absorption chiller = ', @FORMAT(EED,'6.0f'), @NEWLINE(1) );
@WRITE(' WC of DE absorption chiller = ', @FORMAT(VAD,'6.0f'), @NEWLINE(1) );
@WRITE(' WR of DE absorption chiller = ', @FORMAT(WRD,'6.0f'), @NEWLINE(1) );
@WRITE(' WF of DE absorption chiller = ', @FORMAT(WFD,'6.0f'), @NEWLINE(2) );

@WRITE(' EE of absorption chiller = ', @FORMAT(EEA,'6.0f'), @NEWLINE(1) );
@WRITE(' WC of absorption chiller = ', @FORMAT(WCA,'6.0f'), @NEWLINE(1) );
@WRITE(' WR of absorption chiller = ', @FORMAT(WRA,'6.0f'), @NEWLINE(1) );
@WRITE(' WF of absorption chiller = ', @FORMAT(WFA,'6.0f'), @NEWLINE(2) );

@WRITE(' EE of mechanical chiller = ', @FORMAT(EEF,'6.0f'), @NEWLINE(1) );
@WRITE(' WR of mechanical chiller = ', @FORMAT(WRF,'6.0f'), @NEWLINE(1) );
@WRITE(' WF of mechanical chiller = ', @FORMAT(WFF,'6.0f'), @NEWLINE(2) );

@WRITE(' WR of cooling tower      = ', @FORMAT(WRT,'6.0f'), @NEWLINE(1) );
@WRITE(' EE of cooling tower      = ', @FORMAT(EET,'6.0f'), @NEWLINE(1) );
@WRITE(' AA of cooling tower      = ', @FORMAT(ATT,'6.0f'), @NEWLINE(2) );

@WRITE(' Steam going into ICVA    = ', @FORMAT(AAA,'6.0f'), @NEWLINE(1) );
@WRITE(' Hot water into ICWC     = ', @FORMAT(BBB,'6.0f'), @NEWLINE(1) );

```

ENDCALC

!;

SETS:

PINTT(DAYS,HOURS): DVAH\_p, DWCH\_p, DWFH\_p, DEEH\_p, CCGH\_p, CEEH\_p, VEEH\_p, CDIH\_p, CBMH\_p,  
EFVH\_p;

ENDSETS

CALC:

@FOR(DAYS(kd):

```

@FOR(HOURS(kh):
DVAH_p(kd,kh) = @FLOOR( DVAH(kd,kh) );
DWCH_p(kd,kh) = @FLOOR( DWCH(kd,kh) );
DWFH_p(kd,kh) = @FLOOR( DWFH(kd,kh) );
DEEH_p(kd,kh) = @FLOOR( DEEH(kd,kh) );
CCGH_p(kd,kh) = @FLOOR( CCGH(kd,kh) );
EFVH_p(kd,kh) = @FLOOR( 1000 * EFVH(kd,kh) );
CEEH_p(kd,kh) = @FLOOR( 1000 * CEEH(kd,kh) );
VEEH_p(kd,kh) = @FLOOR( 1000 * VEEH(kd,kh) );
CDIH_p(kd,kh) = @FLOOR( CDIH(kd,kh) );
CBMH_p(kd,kh) = @FLOOR( 1000* CBMH(kd,kh) );

);
);
ENDCALC
DATA:
@TEXT ('hospitaljp_RESULTSLCA.txt', 'A') = @WRITE( @NEWLINE(1) , ' Importacao de eletricidade (kW) = ');
@TEXT ('hospitaljp_RESULTSLCA.txt', 'A') = @WRITE( @NEWLINE(1));
@TEXT ('hospitaljp_RESULTSLCA.txt', 'A') = @TABLE( CEEH_p, 2, 1);
@TEXT ('hospitaljp_RESULTSLCA.txt', 'A') = @WRITE( @NEWLINE(2) , ' Producao de eletricidade por Fotovoltaica
(kW)= ');
@TEXT ('hospitaljp_RESULTSLCA.txt', 'A') = @WRITE( @NEWLINE(1));
@TEXT ('hospitaljp_RESULTSLCA.txt', 'A') = @TABLE( EFVH_p, 2, 1);
@TEXT ('hospitaljp_RESULTSLCA.txt', 'A') = @WRITE( @NEWLINE(1) , ' Sale of electricity (kW) = ');
@TEXT ('hospitaljp_RESULTSLCA.txt', 'A') = @WRITE( @NEWLINE(1));
@TEXT ('hospitaljp_RESULTSLCA.txt', 'A') = @TABLE( VEEH_p, 2, 1);
@TEXT ('hospitaljp_RESULTSLCA.txt', 'A') = @WRITE( @NEWLINE(1) , ' Importacao de biomassa (kW) = ');
@TEXT ('hospitaljp_RESULTSLCA.txt', 'A') = @WRITE( @NEWLINE(1));
@TEXT ('hospitaljp_RESULTSLCA.txt', 'A') = @TABLE( CBMH, 2, 1);
@TEXT ('hospitaljp_RESULTSLCA.txt', 'A') = @WRITE( @NEWLINE(2) , ' No. paineis PV funcionando
simultaneamente = ');
@TEXT ('hospitaljp_RESULTSLCA.txt', 'A') = @WRITE( @NEWLINE(1));
@TEXT ('hospitaljp_RESULTSLCA.txt', 'A') = @TABLE( NPS, 2, 1);
@TEXT ('hospitaljp_RESULTSLCA.txt', 'A') = @WRITE( @NEWLINE(2) , ' Radiação solar em plano horizontal = ');
@TEXT ('hospitaljp_RESULTSLCA.txt', 'A') = @WRITE( @NEWLINE(1));
@TEXT ('hospitaljp_RESULTSLCA.txt', 'A') = @TABLE( PPV, 2, 1);

```

## Dados

- ! Technologies (i) 1. TGVA gas turbine - cogenerates high pressure steam;
- ! 2. MGWC gas engine - cogenerates hot water;
- ! 3. CGVA steam boiler - produces high pressure steam;
- ! 4. CGWC gas boiler - produces hot water;
- ! 5. ICVA heat exchanger - high pressure steam-->hot water;
- ! 6. ICWC heat exchanger - hot water-->cold water;
- ! 7. FAVA DE absorption chiller - operates on high pressre steam;
- ! 8. FAWC SE absorption chiller - operates on hot water;
- ! 9. FMWR enfriadora mecanica - operates on electricity;
- ! 10. ICWR Cooling tower - cooling water-->ambient air;
- ! 11. DIWC Diesel engine;
- ! 12. BMWC Biomass hot water boiler;
- ! 13. EEVA Steam electric boiler;
- ! 14. EEWC Hot water electric boiler;
- ! 15. BMVA Biomass steam boiler;

- ! YPT Presence of equipment ( no/yes = 0/1 );
- ! NET Number of pieces of equipment (0, 1, .... );
- ! PET Nominal power of equipment (MW);
- ! PIN Installed power (MW);
- ! CBM Cost of installed equipment (\$ \*\*\*\*\*);
- ! FOV Variable maintenance and operation costs (\$/MWh);
- ! ECO CO2 emissions (kgCO2);
- ! COV CO2 emissions associated with operation and maintenance (kgCO2/MWh);

! YPT, NET, PET, CBM, FOV, ECO, COV = ;  
0, 0 , 0.360, 4000000, 15.00, 80500, 0.00, ! TGVA;

, , 0.410, 463000, 15.00, 353, 0.00, ! MGWC;  
 , , 0.300, 47900, 2.00, 2230000, 0.00, ! CGVA;  
 , , 0.300, 49300, 2.00, 2230000, 0.00, ! CGWC;  
 , , 0.400, 8900, 2.00, 1500, 0.00, ! ICVA;  
 , , 0.400, 7400, 2.00, 1470, 0.00, ! ICWC;  
 , , 0.450, 465200, 10.00, 247000, 0.00, ! FAVA;  
 , , 0.490, 539700, 10.00, 325000, 0.00, ! FAWC;  
 , , 0.270, 217400, 4.00, 13900, 0.00, ! FMWR;  
 , , 1.000, 28000, 10.00, 9710, 0.00, ! ICWR;  
 , , 0.400, 227000, 15.00, 6980000, 0.00, ! DIWC;  
 , , 0.170, 62500, 8.00, 2730, 0.00, ! BMWC;  
 , , 0.150, 42500, 2.00, 2230000, 0.00, ! EEVA;  
 , , 0.150, 28200, 2.00, 2230000, 0.00, ! EEWC;  
 , , 0.250, 51000, 8.00 2730, 0.00 ! BMVA;~





2.66		1.10	0.45			1		! MGWC ;
1.18	1							! CGVA ; !eff=0,85;
1.22		1						! CGWC ; !eff=0,82;
	1.1	1						! ICVA ;
		1.1	1					! ICWC ;
0.77			1.77		1	0.01		! FAVA ;
		1.32	2.32		1	0.01		! FAWC ;
			1.22		1	0.22		! FMWR ;
			1	1.0		0.02		! ICWR ;
	0.80	0.50			1	2.66		! DIWC ;
	1					1.25		! BMWC ; !eff=0,80;
1					1.15			! EEVA ; !eff=0,87;
	1				1.11			! EEWC ; !eff=0,90;
1						1.40		! BMVA ; ~ !eff=0,71;

! Energy Demands;  
! DVAH, DWCH, DWFH, DEEH, DDIH = ;

! VA	WC	WF	EE	DI;	!	January wd	;
0.0000	0.0823	0.0573	0.2912	0.0000	!	!00->01;	
0.0000	0.0672	0.0383	0.2949	0.0000	!	!01->02;	
0.0000	0.0640	0.0209	0.2898	0.0000	!	!02->03;	
0.0000	0.0606	0.0000	0.3074	0.0000	!	!03->04;	
0.0000	0.0884	0.0000	0.3226	0.0000	!	!04->05;	
0.0270	0.1159	0.0000	0.3089	0.0000	!	!05->06;	
0.0270	0.1568	0.0122	0.4986	0.0000	!	!06->07;	
0.0270	0.1980	0.0823	0.5501	0.0000	!	!07->08;	
0.0270	0.2445	0.1830	0.5065	0.0000	!	!08->09;	
0.0270	0.2908	0.2936	0.5643	0.0000	!	!09->10;	
0.0390	0.2553	0.3936	0.5063	0.0000	!	!10->11;	
0.0390	0.2198	0.4724	0.4255	0.0000	!	!11->12;	
0.0390	0.1919	0.5301	0.3433	0.0000	!	!12->13;	
0.0270	0.1637	0.5693	0.4172	0.0000	!	!13->14;	
0.0270	0.1550	0.5870	0.3921	0.0000	!	!14->15;	
0.0270	0.1460	0.5760	0.3594	0.0000	!	!15->16;	
0.0390	0.1582	0.5320	0.2643	0.0000	!	!16->17;	
0.0390	0.1701	0.4616	0.2091	0.0000	!	!17->18;	
0.0270	0.1634	0.3812	0.2035	0.0000	!	!18->19;	
0.0270	0.1564	0.3076	0.1989	0.0000	!	!19->20;	
0.0000	0.1208	0.1554	0.3164	0.0000	!	!20->21;	
0.0000	0.0858	0.1267	0.3023	0.0000	!	!21->22;	
0.0000	0.0916	0.1020	0.3634	0.0000	!	!22->23;	
0.0000	0.0974	0.0787	0.3020	0.0000	!	!23->24;	

! VA	WC	WF	EE	DI;	!	January we	;
0.0000	0.0823	0.0487	0.2438	0.0000	!	!00->01;	
0.0000	0.0672	0.0326	0.2491	0.0000	!	!01->02;	
0.0000	0.0640	0.0178	0.2532	0.0000	!	!02->03;	
0.0000	0.0606	0.0000	0.2603	0.0000	!	!03->04;	
0.0000	0.0884	0.0000	0.2864	0.0000	!	!04->05;	
0.0135	0.1159	0.0000	0.2640	0.0000	!	!05->06;	
0.0135	0.1568	0.0088	0.2811	0.0000	!	!06->07;	
0.0135	0.1980	0.0591	0.3038	0.0000	!	!07->08;	
0.0135	0.2445	0.1315	0.3268	0.0000	!	!08->09;	
0.0135	0.2908	0.2110	0.3456	0.0000	!	!09->10;	
0.0195	0.2553	0.2828	0.2853	0.0000	!	!10->11;	
0.0195	0.2198	0.3395	0.2711	0.0000	!	!11->12;	

0.0195	0.1919	0.3810	0.2209	0.0000	! 12->13;
0.0135	0.1637	0.4091	0.2803	0.0000	! 13->14;
0.0135	0.1550	0.4218	0.1683	0.0000	! 14->15;
0.0135	0.1460	0.4139	0.2697	0.0000	! 15->16;
0.0195	0.1582	0.3823	0.2581	0.0000	! 16->17;
0.0195	0.1701	0.3317	0.1870	0.0000	! 17->18;
0.0135	0.1634	0.2739	0.2016	0.0000	! 18->19;
0.0135	0.1564	0.2210	0.2077	0.0000	! 19->20;
0.0000	0.1208	0.1321	0.2964	0.0000	! 20->21;
0.0000	0.0858	0.1077	0.3050	0.0000	! 21->22;
0.0000	0.0916	0.0867	0.2798	0.0000	! 22->23;
0.0000	0.0974	0.0669	0.2700	0.0000	! 23->24;

! VA	WC	WF	EE	DI;	!	February wd	;
0.0000	0.0823	0.0516	0.2859	0.0000	!	00->01;	
0.0000	0.0672	0.0323	0.2889	0.0000	!	01->02;	
0.0000	0.0640	0.0145	0.2921	0.0000	!	02->03;	
0.0000	0.0606	0.0000	0.2911	0.0000	!	03->04;	
0.0000	0.0884	0.0000	0.3064	0.0000	!	04->05;	
0.0270	0.1159	0.0000	0.3610	0.0000	!	05->06;	
0.0270	0.1568	0.0000	0.5530	0.0000	!	06->07;	
0.0270	0.4259	0.0824	0.5977	0.0000	!	07->08;	
0.0270	0.5259	0.1983	0.7077	0.0000	!	08->09;	
0.0270	0.6254	0.3255	0.6447	0.0000	!	09->10;	
0.0390	0.5491	0.4405	0.5518	0.0000	!	10->11;	
0.0390	0.4728	0.5311	0.4730	0.0000	!	11->12;	
0.0390	0.4127	0.5976	0.4327	0.0000	!	12->13;	
0.0270	0.3521	0.6426	0.4476	0.0000	!	13->14;	
0.0270	0.3333	0.6630	0.4373	0.0000	!	14->15;	
0.0270	0.3139	0.6503	0.3891	0.0000	!	15->16;	
0.0390	0.3402	0.5996	0.2344	0.0000	!	16->17;	
0.0390	0.3658	0.5187	0.2713	0.0000	!	17->18;	
0.0270	0.3515	0.3774	0.2594	0.0000	!	18->19;	
0.0270	0.3365	0.3024	0.2998	0.0000	!	19->20;	
0.0000	0.1208	0.1515	0.3927	0.0000	!	20->21;	
0.0000	0.0858	0.1223	0.4012	0.0000	!	21->22;	
0.0000	0.0916	0.0971	0.4026	0.0000	!	22->23;	
0.0000	0.0974	0.0734	0.3743	0.0000	!	23->24;	

! VA	WC	WF	EE	DI;	!	February we	;
0.0000	0.0823	0.0438	0.2427	0.0000	!	00->01;	
0.0000	0.0672	0.0274	0.2337	0.0000	!	01->02;	
0.0000	0.0640	0.0124	0.2576	0.0000	!	02->03;	
0.0000	0.0606	0.0000	0.2418	0.0000	!	03->04;	
0.0000	0.0884	0.0000	0.2416	0.0000	!	04->05;	
0.0135	0.1159	0.0000	0.3306	0.0000	!	05->06;	
0.0135	0.1568	0.0000	0.2805	0.0000	!	06->07;	
0.0135	0.4259	0.0524	0.3514	0.0000	!	07->08;	
0.0135	0.5259	0.1261	0.3495	0.0000	!	08->09;	
0.0135	0.6254	0.2071	0.3106	0.0000	!	09->10;	
0.0195	0.5491	0.2803	0.2653	0.0000	!	10->11;	
0.0195	0.4728	0.3379	0.2633	0.0000	!	11->12;	
0.0195	0.4127	0.3802	0.2328	0.0000	!	12->13;	
0.0135	0.3521	0.4088	0.2276	0.0000	!	13->14;	
0.0135	0.3333	0.4218	0.2388	0.0000	!	14->15;	
0.0135	0.3139	0.4137	0.2053	0.0000	!	15->16;	
0.0195	0.3402	0.3815	0.1533	0.0000	!	16->17;	
0.0195	0.3658	0.3301	0.1569	0.0000	!	17->18;	
0.0135	0.3515	0.2712	0.1773	0.0000	!	18->19;	



0.0135	0.3365	0.2173	0.2376	0.0000	! 19->20;
0.0000	0.1208	0.1288	0.2752	0.0000	! 20->21;
0.0000	0.0858	0.1040	0.2939	0.0000	! 21->22;
0.0000	0.0916	0.0825	0.3338	0.0000	! 22->23;
0.0000	0.0974	0.0624	0.3455	0.0000	! 23->24;

! VA	WC	WF	EE	DI;	!	March	wd	;
0.0000	0.0823	0.1284	0.2862	0.0000	!	00->01;		
0.0000	0.0672	0.1137	0.2889	0.0000	!	01->02;		
0.0000	0.0640	0.1003	0.2896	0.0000	!	02->03;		
0.0000	0.0606	0.0874	0.2953	0.0000	!	03->04;		
0.0000	0.0884	0.0771	0.3016	0.0000	!	04->05;		
0.0270	0.1159	0.1210	0.3414	0.0000	!	05->06;		
0.0270	0.1568	0.1443	0.5387	0.0000	!	06->07;		
0.0270	0.4259	0.2239	0.6368	0.0000	!	07->08;		
0.0270	0.5259	0.3115	0.7051	0.0000	!	08->09;		
0.0270	0.6254	0.4078	0.6689	0.0000	!	09->10;		
0.0390	0.5491	0.4947	0.5968	0.0000	!	10->11;		
0.0390	0.4728	0.5633	0.4424	0.0000	!	11->12;		
0.0390	0.4127	0.6135	0.4596	0.0000	!	12->13;		
0.0270	0.3521	0.6476	0.4884	0.0000	!	13->14;		
0.0270	0.3333	0.6630	0.4550	0.0000	!	14->15;		
0.0270	0.3139	0.6534	0.4033	0.0000	!	15->16;		
0.0390	0.3402	0.6151	0.3070	0.0000	!	16->17;		
0.0390	0.3658	0.5539	0.2438	0.0000	!	17->18;		
0.0270	0.3515	0.4285	0.2716	0.0000	!	18->19;		
0.0270	0.3365	0.3718	0.2898	0.0000	!	19->20;		
0.0000	0.1208	0.2040	0.4043	0.0000	!	20->21;		
0.0000	0.0858	0.1818	0.3706	0.0000	!	21->22;		
0.0000	0.0916	0.1628	0.3923	0.0000	!	22->23;		
0.0000	0.0974	0.1449	0.3834	0.0000	!	23->24;		

! VA	WC	WF	EE	DI;	!	March	we	;
0.0000	0.0823	0.1091	0.2834	0.0000	!	00->01;		
0.0000	0.0672	0.0967	0.2826	0.0000	!	01->02;		
0.0000	0.0640	0.0853	0.2901	0.0000	!	02->03;		
0.0000	0.0606	0.0743	0.2968	0.0000	!	03->04;		
0.0000	0.0884	0.0655	0.3053	0.0000	!	04->05;		
0.0135	0.1159	0.0869	0.3544	0.0000	!	05->06;		
0.0135	0.1568	0.1037	0.3467	0.0000	!	06->07;		
0.0135	0.4259	0.1424	0.4022	0.0000	!	07->08;		
0.0135	0.5259	0.1982	0.4166	0.0000	!	08->09;		
0.0135	0.6254	0.2594	0.3711	0.0000	!	09->10;		
0.0195	0.5491	0.3148	0.3431	0.0000	!	10->11;		
0.0195	0.4728	0.3584	0.2577	0.0000	!	11->12;		
0.0195	0.4127	0.3903	0.2358	0.0000	!	12->13;		
0.0135	0.3521	0.4120	0.3056	0.0000	!	13->14;		
0.0135	0.3333	0.4218	0.2549	0.0000	!	14->15;		
0.0135	0.3139	0.4157	0.2120	0.0000	!	15->16;		
0.0195	0.3402	0.3914	0.2969	0.0000	!	16->17;		
0.0195	0.3658	0.3524	0.2909	0.0000	!	17->18;		
0.0135	0.3515	0.3079	0.2817	0.0000	!	18->19;		
0.0135	0.3365	0.2672	0.3028	0.0000	!	19->20;		
0.0000	0.1208	0.1734	0.3424	0.0000	!	20->21;		
0.0000	0.0858	0.1546	0.3804	0.0000	!	21->22;		
0.0000	0.0916	0.1383	0.3283	0.0000	!	22->23;		
0.0000	0.0974	0.1231	0.2923	0.0000	!	23->24;		

! VA	WC	WF	EE	DI;	!	April	wd	;
------	----	----	----	-----	---	-------	----	---

0.0000	0.0823	0.0828	0.2659	0.0000	!00->01;
0.0000	0.0672	0.0654	0.2664	0.0000	!01->02;
0.0000	0.0640	0.0494	0.2633	0.0000	!02->03;
0.0000	0.0606	0.0340	0.2673	0.0000	!03->04;
0.0000	0.0884	0.0217	0.2850	0.0000	!04->05;
0.0270	0.1159	0.0318	0.3003	0.0000	!05->06;
0.0270	0.1568	0.0596	0.5384	0.0000	!06->07;
0.0270	0.4259	0.1399	0.6881	0.0000	!07->08;
0.0270	0.5259	0.2443	0.7302	0.0000	!08->09;
0.0270	0.6254	0.3589	0.6773	0.0000	!09->10;
0.0390	0.5491	0.4625	0.5714	0.0000	!10->11;
0.0390	0.4728	0.5442	0.5233	0.0000	!11->12;
0.0390	0.4127	0.6040	0.4790	0.0000	!12->13;
0.0270	0.3521	0.6446	0.5030	0.0000	!13->14;
0.0270	0.3333	0.6630	0.4873	0.0000	!14->15;
0.0270	0.3139	0.6515	0.4513	0.0000	!15->16;
0.0390	0.3402	0.6059	0.3041	0.0000	!16->17;
0.0390	0.3658	0.5330	0.2571	0.0000	!17->18;
0.0270	0.3515	0.3982	0.2478	0.0000	!18->19;
0.0270	0.3365	0.3306	0.2813	0.0000	!19->20;
0.0000	0.1208	0.1728	0.3687	0.0000	!20->21;
0.0000	0.0858	0.1465	0.3961	0.0000	!21->22;
0.0000	0.0916	0.1238	0.4053	0.0000	!22->23;
0.0000	0.0974	0.1024	0.3915	0.0000	!23->24;

! VA	WC	WF	EE	DI;	!	April	we	;
0.0000	0.0823	0.0704	0.3516	0.0000	!			
0.0000	0.0672	0.0556	0.2953	0.0000	!			
0.0000	0.0640	0.0420	0.2659	0.0000	!			
0.0000	0.0606	0.0289	0.2735	0.0000	!			
0.0000	0.0884	0.0184	0.2856	0.0000	!			
0.0135	0.1159	0.0229	0.3345	0.0000	!			
0.0135	0.1568	0.0428	0.3901	0.0000	!			
0.0135	0.4259	0.0890	0.4001	0.0000	!			
0.0135	0.5259	0.1554	0.3563	0.0000	!			
0.0135	0.6254	0.2284	0.3219	0.0000	!			
0.0195	0.5491	0.2943	0.3326	0.0000	!			
0.0195	0.4728	0.3463	0.3093	0.0000	!			
0.0195	0.4127	0.3843	0.2376	0.0000	!			
0.0135	0.3521	0.4101	0.2858	0.0000	!			
0.0135	0.3333	0.4218	0.2312	0.0000	!			
0.0135	0.3139	0.4145	0.2553	0.0000	!			
0.0195	0.3402	0.3855	0.3096	0.0000	!			
0.0195	0.3658	0.3391	0.2876	0.0000	!			
0.0135	0.3515	0.2861	0.2833	0.0000	!			
0.0135	0.3365	0.2376	0.3228	0.0000	!			
0.0000	0.1208	0.1469	0.2888	0.0000	!			
0.0000	0.0858	0.1245	0.3119	0.0000	!			
0.0000	0.0916	0.1052	0.3138	0.0000	!			
0.0000	0.0974	0.0871	0.3037	0.0000	!			

! VA	WC	WF	EE	DI;	!	May	wd	;
0.0000	0.0823	0.1226	0.3328	0.0000	!			
0.0000	0.0672	0.1077	0.2966	0.0000	!			
0.0000	0.0640	0.0939	0.2938	0.0000	!			
0.0000	0.0606	0.0807	0.2639	0.0000	!			
0.0000	0.0884	0.0701	0.2631	0.0000	!			
0.0270	0.1159	0.1098	0.3289	0.0000	!			
0.0270	0.1568	0.1336	0.5174	0.0000	!			

0.0270	0.4259	0.2133	0.6303	0.0000	! 07->08;
0.0270	0.5259	0.3030	0.5890	0.0000	! 08->09;
0.0270	0.6254	0.4016	0.5753	0.0000	! 09->10;
0.0390	0.5491	0.4907	0.4945	0.0000	! 10->11;
0.0390	0.4728	0.5609	0.4221	0.0000	! 11->12;
0.0390	0.4127	0.6123	0.4126	0.0000	! 12->13;
0.0270	0.3521	0.6472	0.4506	0.0000	! 13->14;
0.0270	0.3333	0.6630	0.4069	0.0000	! 14->15;
0.0270	0.3139	0.6531	0.3361	0.0000	! 15->16;
0.0390	0.3402	0.6139	0.2679	0.0000	! 16->17;
0.0390	0.3658	0.5513	0.1510	0.0000	! 17->18;
0.0270	0.3515	0.4247	0.1662	0.0000	! 18->19;
0.0270	0.3365	0.3666	0.2592	0.0000	! 19->20;
0.0000	0.1208	0.2000	0.3590	0.0000	! 20->21;
0.0000	0.0858	0.1774	0.3614	0.0000	! 21->22;
0.0000	0.0916	0.1579	0.3659	0.0000	! 22->23;
0.0000	0.0974	0.1395	0.3567	0.0000	! 23->24;

! VA	WC	WF	EE	DI;	!	May	we	;
0.0000	0.0823	0.1042	0.2671	0.0000	!	00->01;		
0.0000	0.0672	0.0915	0.2721	0.0000	!	01->02;		
0.0000	0.0640	0.0798	0.2709	0.0000	!	02->03;		
0.0000	0.0606	0.0686	0.2729	0.0000	!	03->04;		
0.0000	0.0884	0.0596	0.2773	0.0000	!	04->05;		
0.0135	0.1159	0.0789	0.2591	0.0000	!	05->06;		
0.0135	0.1568	0.0960	0.3353	0.0000	!	06->07;		
0.0135	0.4259	0.1357	0.2719	0.0000	!	07->08;		
0.0135	0.5259	0.1928	0.2610	0.0000	!	08->09;		
0.0135	0.6254	0.2555	0.3099	0.0000	!	09->10;		
0.0195	0.5491	0.3122	0.2803	0.0000	!	10->11;		
0.0195	0.4728	0.3569	0.2534	0.0000	!	11->12;		
0.0195	0.4127	0.3896	0.2404	0.0000	!	12->13;		
0.0135	0.3521	0.4118	0.2536	0.0000	!	13->14;		
0.0135	0.3333	0.4218	0.2449	0.0000	!	14->15;		
0.0135	0.3139	0.4156	0.2518	0.0000	!	15->16;		
0.0195	0.3402	0.3906	0.2446	0.0000	!	16->17;		
0.0195	0.3658	0.3508	0.1910	0.0000	!	17->18;		
0.0135	0.3515	0.3052	0.2091	0.0000	!	18->19;		
0.0135	0.3365	0.2634	0.2196	0.0000	!	19->20;		
0.0000	0.1208	0.1700	0.3110	0.0000	!	20->21;		
0.0000	0.0858	0.1508	0.3083	0.0000	!	21->22;		
0.0000	0.0916	0.1342	0.3149	0.0000	!	22->23;		
0.0000	0.0974	0.1186	0.2631	0.0000	!	23->24;		

! VA	WC	WF	EE	DI;	!	June	wd	;
0.0000	0.0496	0.1165	0.2487	0.0000	!	00->01;		
0.0000	0.0405	0.1011	0.2668	0.0000	!	01->02;		
0.0000	0.0386	0.0870	0.2713	0.0000	!	02->03;		
0.0000	0.0365	0.0735	0.2693	0.0000	!	03->04;		
0.0000	0.0533	0.0626	0.2721	0.0000	!	04->05;		
0.0270	0.0699	0.0977	0.3529	0.0000	!	05->06;		
0.0270	0.0945	0.1222	0.3876	0.0000	!	06->07;		
0.0270	0.3475	0.2020	0.4535	0.0000	!	07->08;		
0.0270	0.4292	0.2940	0.5061	0.0000	!	08->09;		
0.0270	0.5103	0.3950	0.4780	0.0000	!	09->10;		
0.0390	0.4481	0.4863	0.4141	0.0000	!	10->11;		
0.0390	0.3858	0.5583	0.3267	0.0000	!	11->12;		
0.0390	0.3368	0.6110	0.2876	0.0000	!	12->13;		
0.0270	0.2873	0.6468	0.3014	0.0000	!	13->14;		

0.0270	0.2720	0.6630	0.2933	0.0000	! 14->15;
0.0270	0.2562	0.6529	0.2667	0.0000	! 15->16;
0.0390	0.2776	0.6127	0.2000	0.0000	! 16->17;
0.0390	0.2985	0.5485	0.1808	0.0000	! 17->18;
0.0270	0.2868	0.4206	0.2224	0.0000	! 18->19;
0.0270	0.2746	0.3610	0.2333	0.0000	! 19->20;
0.0000	0.0729	0.1958	0.2881	0.0000	! 20->21;
0.0000	0.0517	0.1726	0.3230	0.0000	! 21->22;
0.0000	0.0552	0.1526	0.3306	0.0000	! 22->23;
0.0000	0.0587	0.1338	0.3145	0.0000	! 23->24;

! VA	WC	WF	EE	DI;	!	June	we	;
0.0000	0.0496	0.0990	0.2711	0.0000	! 00->01;			
0.0000	0.0405	0.0860	0.2719	0.0000	! 01->02;			
0.0000	0.0386	0.0740	0.2654	0.0000	! 02->03;			
0.0000	0.0365	0.0624	0.2651	0.0000	! 03->04;			
0.0000	0.0533	0.0532	0.2617	0.0000	! 04->05;			
0.0135	0.0699	0.0702	0.2501	0.0000	! 05->06;			
0.0135	0.0945	0.0878	0.3724	0.0000	! 06->07;			
0.0135	0.3475	0.1285	0.3592	0.0000	! 07->08;			
0.0135	0.4292	0.1870	0.3245	0.0000	! 08->09;			
0.0135	0.5103	0.2513	0.3266	0.0000	! 09->10;			
0.0195	0.4481	0.3094	0.2899	0.0000	! 10->11;			
0.0195	0.3858	0.3552	0.2597	0.0000	! 11->12;			
0.0195	0.3368	0.3888	0.2617	0.0000	! 12->13;			
0.0135	0.2873	0.4115	0.2567	0.0000	! 13->14;			
0.0135	0.2720	0.4218	0.2716	0.0000	! 14->15;			
0.0135	0.2562	0.4154	0.2495	0.0000	! 15->16;			
0.0195	0.2776	0.3898	0.2559	0.0000	! 16->17;			
0.0195	0.2985	0.3490	0.1967	0.0000	! 17->18;			
0.0135	0.2868	0.3022	0.2669	0.0000	! 18->19;			
0.0135	0.2746	0.2594	0.2782	0.0000	! 19->20;			
0.0000	0.0729	0.1665	0.3218	0.0000	! 20->21;			
0.0000	0.0517	0.1467	0.3053	0.0000	! 21->22;			
0.0000	0.0552	0.1297	0.3217	0.0000	! 22->23;			
0.0000	0.0587	0.1137	0.3284	0.0000	! 23->24;			

! VA	WC	WF	EE	DI;	!	July	wd	;
0.0000	0.0496	0.0000	0.2536	0.0000	! 00->01;			
0.0000	0.0405	0.0000	0.2545	0.0000	! 01->02;			
0.0000	0.0386	0.0000	0.2557	0.0000	! 02->03;			
0.0000	0.0365	0.0000	0.2549	0.0000	! 03->04;			
0.0000	0.0533	0.0000	0.2545	0.0000	! 04->05;			
0.0270	0.0699	0.0000	0.3317	0.0000	! 05->06;			
0.0270	0.0945	0.0000	0.3269	0.0000	! 06->07;			
0.0270	0.2568	0.0000	0.3989	0.0000	! 07->08;			
0.0270	0.3171	0.1004	0.4588	0.0000	! 08->09;			
0.0270	0.3771	0.2337	0.3959	0.0000	! 09->10;			
0.0390	0.3311	0.3540	0.3307	0.0000	! 10->11;			
0.0390	0.2851	0.4490	0.2692	0.0000	! 11->12;			
0.0390	0.2489	0.5185	0.2209	0.0000	! 12->13;			
0.0270	0.2123	0.5656	0.2305	0.0000	! 13->14;			
0.0270	0.2010	0.5870	0.2215	0.0000	! 14->15;			
0.0270	0.1893	0.5737	0.2046	0.0000	! 15->16;			
0.0390	0.2051	0.5207	0.1439	0.0000	! 16->17;			
0.0390	0.2206	0.4360	0.1669	0.0000	! 17->18;			
0.0270	0.2119	0.3392	0.1802	0.0000	! 18->19;			
0.0270	0.2029	0.2505	0.2100	0.0000	! 19->20;			
0.0000	0.0729	0.1123	0.2539	0.0000	! 20->21;			

0.0000	0.0517	0.0777	0.3493	0.0000	! 21->22;
0.0000	0.0552	0.0478	0.3538	0.0000	! 22->23;
0.0000	0.0587	0.0199	0.2471	0.0000	! 23->24;

! VA	WC	WF	EE	DI;	!	July	we	;
0.0000	0.0496	0.0000	0.2575	0.0000	!	00->01;		
0.0000	0.0405	0.0000	0.2594	0.0000	!	01->02;		
0.0000	0.0386	0.0000	0.2534	0.0000	!	02->03;		
0.0000	0.0365	0.0000	0.2551	0.0000	!	03->04;		
0.0000	0.0533	0.0000	0.2489	0.0000	!	04->05;		
0.0135	0.0699	0.0000	0.2317	0.0000	!	05->06;		
0.0135	0.0945	0.0000	0.2404	0.0000	!	06->07;		
0.0135	0.2568	0.0000	0.3144	0.0000	!	07->08;		
0.0135	0.3171	0.0722	0.3298	0.0000	!	08->09;		
0.0135	0.3771	0.1679	0.3000	0.0000	!	09->10;		
0.0195	0.3311	0.2544	0.2530	0.0000	!	10->11;		
0.0195	0.2851	0.3226	0.2379	0.0000	!	11->12;		
0.0195	0.2489	0.3726	0.2013	0.0000	!	12->13;		
0.0135	0.2123	0.4065	0.2087	0.0000	!	13->14;		
0.0135	0.2010	0.4218	0.1928	0.0000	!	14->15;		
0.0135	0.1893	0.4123	0.2259	0.0000	!	15->16;		
0.0195	0.2051	0.3742	0.2137	0.0000	!	16->17;		
0.0195	0.2206	0.3133	0.1379	0.0000	!	17->18;		
0.0135	0.2119	0.2437	0.2293	0.0000	!	18->19;		
0.0135	0.2029	0.1800	0.2572	0.0000	!	19->20;		
0.0000	0.0729	0.0954	0.2866	0.0000	!	20->21;		
0.0000	0.0517	0.0660	0.3273	0.0000	!	21->22;		
0.0000	0.0552	0.0407	0.3250	0.0000	!	22->23;		
0.0000	0.0587	0.0169	0.2575	0.0000	!	23->24;		

! VA	WC	WF	EE	DI;	!	August	wd	;
0.0000	0.0496	0.0959	0.2124	0.0000	!	00->01;		
0.0000	0.0405	0.0793	0.2146	0.0000	!	01->02;		
0.0000	0.0386	0.0641	0.2222	0.0000	!	02->03;		
0.0000	0.0365	0.0494	0.2238	0.0000	!	03->04;		
0.0000	0.0533	0.0377	0.2295	0.0000	!	04->05;		
0.0270	0.0699	0.0576	0.1979	0.0000	!	05->06;		
0.0270	0.0945	0.0840	0.3341	0.0000	!	06->07;		
0.0270	0.2568	0.1641	0.3591	0.0000	!	07->08;		
0.0270	0.3171	0.2637	0.4230	0.0000	!	08->09;		
0.0270	0.3771	0.3730	0.3859	0.0000	!	09->10;		
0.0390	0.3311	0.4718	0.3402	0.0000	!	10->11;		
0.0390	0.2851	0.5497	0.2572	0.0000	!	11->12;		
0.0390	0.2489	0.6068	0.2327	0.0000	!	12->13;		
0.0270	0.2123	0.6455	0.2187	0.0000	!	13->14;		
0.0270	0.2010	0.6630	0.2076	0.0000	!	14->15;		
0.0270	0.1893	0.6521	0.1790	0.0000	!	15->16;		
0.0390	0.2051	0.6086	0.1580	0.0000	!	16->17;		
0.0390	0.2206	0.5391	0.1466	0.0000	!	17->18;		
0.0270	0.2119	0.4069	0.2029	0.0000	!	18->19;		
0.0270	0.2029	0.3425	0.2175	0.0000	!	19->20;		
0.0000	0.0729	0.1818	0.2819	0.0000	!	20->21;		
0.0000	0.0517	0.1567	0.2359	0.0000	!	21->22;		
0.0000	0.0552	0.1350	0.2270	0.0000	!	22->23;		
0.0000	0.0587	0.1147	0.2463	0.0000	!	23->24;		

! VA	WC	WF	EE	DI;	!	September	wd	;
0.0000	0.0496	0.1027	0.2893	0.0000	!	00->01;		
0.0000	0.0405	0.0865	0.2121	0.0000	!	01->02;		

0.0000	0.0386	0.0717	0.2163	0.0000	!02->03;
0.0000	0.0365	0.0573	0.2296	0.0000	!03->04;
0.0000	0.0533	0.0459	0.2270	0.0000	!04->05;
0.0270	0.0699	0.0708	0.2563	0.0000	!05->06;
0.0270	0.0945	0.0966	0.4295	0.0000	!06->07;
0.0270	0.2568	0.1766	0.4931	0.0000	!07->08;
0.0270	0.3171	0.2737	0.5164	0.0000	!08->09;
0.0270	0.3771	0.3803	0.4415	0.0000	!09->10;
0.0390	0.3311	0.4766	0.3494	0.0000	!10->11;
0.0390	0.2851	0.5525	0.2744	0.0000	!11->12;
0.0390	0.2489	0.6082	0.2545	0.0000	!12->13;
0.0270	0.2123	0.6459	0.2467	0.0000	!13->14;
0.0270	0.2010	0.6630	0.2597	0.0000	!14->15;
0.0270	0.1893	0.6523	0.1927	0.0000	!15->16;
0.0390	0.2051	0.6099	0.1431	0.0000	!16->17;
0.0390	0.2206	0.5422	0.1418	0.0000	!17->18;
0.0270	0.2119	0.4114	0.1798	0.0000	!18->19;
0.0270	0.2029	0.3486	0.1997	0.0000	!19->20;
0.0000	0.0729	0.1864	0.2850	0.0000	!20->21;
0.0000	0.0517	0.1620	0.2926	0.0000	!21->22;
0.0000	0.0552	0.1408	0.2774	0.0000	!22->23;
0.0000	0.0587	0.1210	0.2782	0.0000	!23->24;

! VA	WC	WF	EE	DI;	!	August	we	;
0.0000	0.0496	0.0815	0.2098	0.0000	!	!00->01;		
0.0000	0.0405	0.0674	0.2162	0.0000	!	!01->02;		
0.0000	0.0386	0.0545	0.2156	0.0000	!	!02->03;		
0.0000	0.0365	0.0420	0.2132	0.0000	!	!03->04;		
0.0000	0.0533	0.0320	0.2154	0.0000	!	!04->05;		
0.0135	0.0699	0.0414	0.2128	0.0000	!	!05->06;		
0.0135	0.0945	0.0604	0.3055	0.0000	!	!06->07;		
0.0135	0.2568	0.1044	0.2738	0.0000	!	!07->08;		
0.0135	0.3171	0.1678	0.2664	0.0000	!	!08->09;		
0.0135	0.3771	0.2374	0.2389	0.0000	!	!09->10;		
0.0195	0.3311	0.3002	0.1984	0.0000	!	!10->11;		
0.0195	0.2851	0.3498	0.1695	0.0000	!	!11->12;		
0.0195	0.2489	0.3861	0.1650	0.0000	!	!12->13;		
0.0135	0.2123	0.4107	0.1810	0.0000	!	!13->14;		
0.0135	0.2010	0.4218	0.1845	0.0000	!	!14->15;		
0.0135	0.1893	0.4149	0.1794	0.0000	!	!15->16;		
0.0195	0.2051	0.3872	0.0766	0.0000	!	!16->17;		
0.0195	0.2206	0.3430	0.0904	0.0000	!	!17->18;		
0.0135	0.2119	0.2924	0.1250	0.0000	!	!18->19;		
0.0135	0.2029	0.2461	0.1625	0.0000	!	!19->20;		
0.0000	0.0729	0.1545	0.1770	0.0000	!	!20->21;		
0.0000	0.0517	0.1332	0.2119	0.0000	!	!21->22;		
0.0000	0.0552	0.1148	0.1977	0.0000	!	!22->23;		
0.0000	0.0587	0.0975	0.1941	0.0000	!	!23->24;		

! VA	WC	WF	EE	DI;	!	September	we	;
0.0000	0.0496	0.0873	0.1931	0.0000	!	!00->01;		
0.0000	0.0405	0.0735	0.2090	0.0000	!	!01->02;		
0.0000	0.0386	0.0609	0.2126	0.0000	!	!02->03;		
0.0000	0.0365	0.0487	0.2018	0.0000	!	!03->04;		
0.0000	0.0533	0.0390	0.2248	0.0000	!	!04->05;		
0.0135	0.0699	0.0509	0.1941	0.0000	!	!05->06;		
0.0135	0.0945	0.0694	0.2583	0.0000	!	!06->07;		
0.0135	0.2568	0.1124	0.1867	0.0000	!	!07->08;		

0.0135	0.3171	0.1741	0.1713	0.0000	!08->09;
0.0135	0.3771	0.2420	0.1582	0.0000	!09->10;
0.0195	0.3311	0.3032	0.1355	0.0000	!10->11;
0.0195	0.2851	0.3516	0.1692	0.0000	!11->12;
0.0195	0.2489	0.3870	0.1846	0.0000	!12->13;
0.0135	0.2123	0.4110	0.1556	0.0000	!13->14;
0.0135	0.2010	0.4218	0.1852	0.0000	!14->15;
0.0135	0.1893	0.4151	0.2086	0.0000	!15->16;
0.0195	0.2051	0.3881	0.1684	0.0000	!16->17;
0.0195	0.2206	0.3449	0.1860	0.0000	!17->18;
0.0135	0.2119	0.2957	0.1454	0.0000	!18->19;
0.0135	0.2029	0.2505	0.1595	0.0000	!19->20;
0.0000	0.0729	0.1585	0.2804	0.0000	!20->21;
0.0000	0.0517	0.1377	0.2955	0.0000	!21->22;
0.0000	0.0552	0.1197	0.2378	0.0000	!22->23;
0.0000	0.0587	0.1028	0.2335	0.0000	!23->24;

! VA	WC	WF	EE	DI;	!	October wd	;
0.0000	0.0823	0.1680	0.2110	0.0000	!	00->01;	
0.0000	0.0672	0.1558	0.2082	0.0000	!	01->02;	
0.0000	0.0640	0.1447	0.2200	0.0000	!	02->03;	
0.0000	0.0606	0.1339	0.2189	0.0000	!	03->04;	
0.0000	0.0884	0.1253	0.2072	0.0000	!	04->05;	
0.0270	0.1159	0.1986	0.2226	0.0000	!	05->06;	
0.0270	0.1568	0.2180	0.5499	0.0000	!	06->07;	
0.0270	0.3351	0.2970	0.6336	0.0000	!	07->08;	
0.0270	0.4139	0.3700	0.6370	0.0000	!	08->09;	
0.0270	0.4921	0.4503	0.5734	0.0000	!	09->10;	
0.0390	0.4321	0.5227	0.4724	0.0000	!	10->11;	
0.0390	0.3721	0.5799	0.3727	0.0000	!	11->12;	
0.0390	0.3248	0.6217	0.4312	0.0000	!	12->13;	
0.0270	0.2771	0.6501	0.4243	0.0000	!	13->14;	
0.0270	0.2623	0.6630	0.3975	0.0000	!	14->15;	
0.0270	0.2471	0.6550	0.3391	0.0000	!	15->16;	
0.0390	0.2677	0.6231	0.2179	0.0000	!	16->17;	
0.0390	0.2879	0.5721	0.1562	0.0000	!	17->18;	
0.0270	0.2766	0.4549	0.1725	0.0000	!	18->19;	
0.0270	0.2648	0.4076	0.2221	0.0000	!	19->20;	
0.0000	0.1208	0.2310	0.3276	0.0000	!	20->21;	
0.0000	0.0858	0.2126	0.3255	0.0000	!	21->22;	
0.0000	0.0916	0.1967	0.3127	0.0000	!	22->23;	
0.0000	0.0974	0.1818	0.1881	0.0000	!	23->24;	

! VA	WC	WF	EE	DI;	!	October we	;
0.0000	0.0823	0.1428	0.2277	0.0000	!	00->01;	
0.0000	0.0672	0.1325	0.2273	0.0000	!	01->02;	
0.0000	0.0640	0.1230	0.2318	0.0000	!	02->03;	
0.0000	0.0606	0.1138	0.2335	0.0000	!	03->04;	
0.0000	0.0884	0.1065	0.2461	0.0000	!	04->05;	
0.0135	0.1159	0.1427	0.2323	0.0000	!	05->06;	
0.0135	0.1568	0.1566	0.3220	0.0000	!	06->07;	
0.0135	0.3351	0.1890	0.3614	0.0000	!	07->08;	
0.0135	0.4139	0.2354	0.3438	0.0000	!	08->09;	
0.0135	0.4921	0.2865	0.2921	0.0000	!	09->10;	
0.0195	0.4321	0.3326	0.2780	0.0000	!	10->11;	
0.0195	0.3721	0.3690	0.2549	0.0000	!	11->12;	
0.0195	0.3248	0.3956	0.2533	0.0000	!	12->13;	
0.0135	0.2771	0.4137	0.2573	0.0000	!	13->14;	
0.0135	0.2623	0.4218	0.2412	0.0000	!	14->15;	

0.0135	0.2471	0.4167	0.2555	0.0000	! 15->16;
0.0195	0.2677	0.3964	0.1969	0.0000	! 16->17;
0.0195	0.2879	0.3640	0.1763	0.0000	! 17->18;
0.0135	0.2766	0.3269	0.1982	0.0000	! 18->19;
0.0135	0.2648	0.2929	0.1862	0.0000	! 19->20;
0.0000	0.1208	0.1964	0.2395	0.0000	! 20->21;
0.0000	0.0858	0.1807	0.2461	0.0000	! 21->22;
0.0000	0.0916	0.1672	0.2340	0.0000	! 22->23;
0.0000	0.0974	0.1545	0.2332	0.0000	! 23->24;

! VA	WC	WF	EE	DI;	!	November	wd	;
0.0000	0.0823	0.1403	0.2763	0.0000	!	00->01;		
0.0000	0.0672	0.1264	0.2715	0.0000	!	01->02;		
0.0000	0.0640	0.1136	0.2755	0.0000	!	02->03;		
0.0000	0.0606	0.1013	0.2702	0.0000	!	03->04;		
0.0000	0.0884	0.0915	0.3025	0.0000	!	04->05;		
0.0270	0.1159	0.1443	0.3449	0.0000	!	05->06;		
0.0270	0.1568	0.1664	0.6217	0.0000	!	06->07;		
0.0270	0.4259	0.2458	0.6855	0.0000	!	07->08;		
0.0270	0.5259	0.3291	0.6632	0.0000	!	08->09;		
0.0270	0.6254	0.4205	0.6556	0.0000	!	09->10;		
0.0390	0.5491	0.5031	0.5869	0.0000	!	10->11;		
0.0390	0.4728	0.5683	0.4861	0.0000	!	11->12;		
0.0390	0.4127	0.6160	0.4605	0.0000	!	12->13;		
0.0270	0.3521	0.6483	0.4533	0.0000	!	13->14;		
0.0270	0.3333	0.6630	0.4401	0.0000	!	14->15;		
0.0270	0.3139	0.6539	0.3071	0.0000	!	15->16;		
0.0390	0.3402	0.6175	0.2652	0.0000	!	16->17;		
0.0390	0.3658	0.5594	0.1871	0.0000	!	17->18;		
0.0270	0.3515	0.4364	0.2931	0.0000	!	18->19;		
0.0270	0.3365	0.3825	0.3059	0.0000	!	19->20;		
0.0000	0.1208	0.2121	0.3163	0.0000	!	20->21;		
0.0000	0.0858	0.1911	0.2900	0.0000	!	21->22;		
0.0000	0.0916	0.1730	0.2786	0.0000	!	22->23;		
0.0000	0.0974	0.1559	0.2716	0.0000	!	23->24;		

! VA	WC	WF	EE	DI;	!	November	we	;
0.0000	0.0823	0.1192	0.2880	0.0000	!	00->01;		
0.0000	0.0672	0.1074	0.2833	0.0000	!	01->02;		
0.0000	0.0640	0.0966	0.2838	0.0000	!	02->03;		
0.0000	0.0606	0.0861	0.2944	0.0000	!	03->04;		
0.0000	0.0884	0.0778	0.2924	0.0000	!	04->05;		
0.0135	0.1159	0.1037	0.2920	0.0000	!	05->06;		
0.0135	0.1568	0.1196	0.3693	0.0000	!	06->07;		
0.0135	0.4259	0.1564	0.3078	0.0000	!	07->08;		
0.0135	0.5259	0.2094	0.3537	0.0000	!	08->09;		
0.0135	0.6254	0.2676	0.3233	0.0000	!	09->10;		
0.0195	0.5491	0.3201	0.2417	0.0000	!	10->11;		
0.0195	0.4728	0.3616	0.1968	0.0000	!	11->12;		
0.0195	0.4127	0.3919	0.2047	0.0000	!	12->13;		
0.0135	0.3521	0.4125	0.2064	0.0000	!	13->14;		
0.0135	0.3333	0.4218	0.2024	0.0000	!	14->15;		
0.0135	0.3139	0.4160	0.1827	0.0000	!	15->16;		
0.0195	0.3402	0.3929	0.1808	0.0000	!	16->17;		
0.0195	0.3658	0.3559	0.1311	0.0000	!	17->18;		
0.0135	0.3515	0.3136	0.1611	0.0000	!	18->19;		
0.0135	0.3365	0.2749	0.2068	0.0000	!	19->20;		
0.0000	0.1208	0.1803	0.2495	0.0000	!	20->21;		
0.0000	0.0858	0.1624	0.2461	0.0000	!	21->22;		



0.0000 0.0916 0.1470 0.2585 0.0000 !22->23;  
 0.0000 0.0974 0.1325 0.2648 0.0000 !23->24;

! VA	WC	WF	EE	DI;	!	December	wd	;
0.0000	0.0823	0.0000	0.3196	0.0000	!	00->01;		
0.0000	0.0672	0.0000	0.3179	0.0000	!	01->02;		
0.0000	0.0640	0.0000	0.3180	0.0000	!	02->03;		
0.0000	0.0606	0.0000	0.3178	0.0000	!	03->04;		
0.0000	0.0884	0.0000	0.3383	0.0000	!	04->05;		
0.0270	0.1159	0.0000	0.4212	0.0000	!	05->06;		
0.0270	0.1568	0.0000	0.6375	0.0000	!	06->07;		
0.0270	0.4259	0.0000	0.7753	0.0000	!	07->08;		
0.0270	0.5259	0.1390	0.8103	0.0000	!	08->09;		
0.0270	0.6254	0.2825	0.7403	0.0000	!	09->10;		
0.0390	0.5491	0.4121	0.6329	0.0000	!	10->11;		
0.0390	0.4728	0.5143	0.5131	0.0000	!	11->12;		
0.0390	0.4127	0.5892	0.4591	0.0000	!	12->13;		
0.0270	0.3521	0.6400	0.4555	0.0000	!	13->14;		
0.0270	0.3333	0.6630	0.4571	0.0000	!	14->15;		
0.0270	0.3139	0.6486	0.3489	0.0000	!	15->16;		
0.0390	0.3402	0.5916	0.2779	0.0000	!	16->17;		
0.0390	0.3658	0.5004	0.2912	0.0000	!	17->18;		
0.0270	0.3515	0.3507	0.2215	0.0000	!	18->19;		
0.0270	0.3365	0.2662	0.3144	0.0000	!	19->20;		
0.0000	0.1208	0.1241	0.4216	0.0000	!	20->21;		
0.0000	0.0858	0.0912	0.3118	0.0000	!	21->22;		
0.0000	0.0916	0.0627	0.3279	0.0000	!	22->23;		
0.0000	0.0974	0.0360	0.3271	0.0000	!	23->24;		

! VA	WC	WF	EE	DI;	!	December	we	;
0.0000	0.0823	0.0000	0.3218	0.0000	!	00->01;		
0.0000	0.0672	0.0000	0.3130	0.0000	!	01->02;		
0.0000	0.0640	0.0000	0.2984	0.0000	!	02->03;		
0.0000	0.0606	0.0000	0.3060	0.0000	!	03->04;		
0.0000	0.0884	0.0000	0.2888	0.0000	!	04->05;		
0.0135	0.1159	0.0000	0.3359	0.0000	!	05->06;		
0.0135	0.1568	0.0000	0.4132	0.0000	!	06->07;		
0.0135	0.4259	0.0000	0.3603	0.0000	!	07->08;		
0.0135	0.5259	0.0885	0.4208	0.0000	!	08->09;		
0.0135	0.6254	0.1798	0.3828	0.0000	!	09->10;		
0.0195	0.5491	0.2622	0.3557	0.0000	!	10->11;		
0.0195	0.4728	0.3273	0.2740	0.0000	!	11->12;		
0.0195	0.4127	0.3749	0.3102	0.0000	!	12->13;		
0.0135	0.3521	0.4072	0.2905	0.0000	!	13->14;		
0.0135	0.3333	0.4218	0.2724	0.0000	!	14->15;		
0.0135	0.3139	0.4127	0.2524	0.0000	!	15->16;		
0.0195	0.3402	0.3764	0.2544	0.0000	!	16->17;		
0.0195	0.3658	0.3184	0.2147	0.0000	!	17->18;		
0.0135	0.3515	0.2520	0.2338	0.0000	!	18->19;		
0.0135	0.3365	0.1913	0.2590	0.0000	!	19->20;		
0.0000	0.1208	0.1055	0.3042	0.0000	!	20->21;		
0.0000	0.0858	0.0775	0.2989	0.0000	!	21->22;		
0.0000	0.0916	0.0533	0.3065	0.0000	!	22->23;		
0.0000	0.0974	0.0306	0.3207	0.0000	!	23->24; ~		